

EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD DE UNA MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA DOMÉSTICA EN ALTA MONTAÑA

SANTIAGO CORREA COTE

Trabajo de grado para optar por el título de

Ingeniero Civil

Director:

Santiago Ortega Arango

Magister en Ingeniería de recursos hidráulicos



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2017**

AGRADECIMIENTOS

A Santiago Ortega Arango por su colaboración y compromiso como director del trabajo de grado de principio a fin, sin él no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

A Daniel Ruíz Carrascal y Martha Isabel Posada Posada. Por su colaboración en la recolección de datos; y su disponibilidad a la hora de requerir asistencia con el procesamiento de la información.

A Ricardo Hernández, autor y desarrollador del software Energis. Por su gran ayuda en el momento de tener dificultades con el programa.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| 1. PRELIMINARES..... | 15 |
| 1.1 Planteamiento del problema | 15 |
| 1.1.1 Contexto y caracterización del problema | 15 |
| 1.1.2 Ubicación tentativa del centro de investigación | 17 |
| 1.2 Objetivos del proyecto | 19 |
| 1.2.1 Objetivo General..... | 19 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 19 |
| 1.3 Marco de referencia..... | 19 |
| 1.3.1 Marco Contextual | 19 |
| 1.3.2 Marco teórico..... | 20 |
| 1.3.2.1 Cálculo de la potencia de una central hidroeléctrica | 21 |
| 1.3.2.2 Energía..... | 22 |
| 1.3.2.3 Energía firme..... | 22 |
| 1.3.2.4 Caudal ecológico | 22 |
| 2. METODOLOGÍA..... | 23 |
| 2.1 Etapa 1. Establecimiento de los consumos del centro de investigación. | 23 |
| 2.2 Etapa 2. Estudio hidrológico de la zona y cuantificación del recurso hídrico | 24 |
| 2.3 etapa 3. Establecimiento del potencial hidroeléctrico en la zona. | 25 |
| 2.4 Etapa 4 selección de la tecnología y diseño conceptual de obras civiles. | 25 |
| 3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 26 |
| 3.1 Establecimiento de consumos y demandas del centro de investigación. | 26 |
| 3.2 Estudio hidrológico | 28 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.2.1 | Zona de estudio..... | 28 |
| 3.2.2 | Información disponible..... | 28 |
| 3.2.3 | Modelación en QGIS | 31 |
| 3.2.4 | Balance hídrico de largo plazo..... | 32 |
| 3.2.5 | Tamaño del proyecto | 33 |
| 3.2.6 | Información Morfométrica de las cuencas..... | 36 |
| 3.2.7 | Análisis de las series de caudales del IDEAM | 37 |
| 3.2.8 | Regionalización | 38 |
| 3.2.9 | Medición de caudal en campo | 39 |
| 3.2.10 | Normalización de la serie de caudales | 42 |
| 3.2.11 | Ciclo anual de caudales..... | 43 |
| 3.2.12 | Curva de duración de caudales | 43 |
| 3.2.13 | Caudal producido y vertido | 45 |
| 3.3 | Potencial de la zona | 46 |
| 3.4 | Diseño conceptual de obras civiles y costos | 49 |
| 3.4.1 | Diseño de la captación | 49 |
| | Los principales elementos de la central son los siguientes:..... | 50 |
| 3.4.1.1 | Diseño de la presa..... | 51 |
| 3.4.1.2 | Diseño de la rejilla y del canal de aducción | 52 |
| 3.4.1.3 | Niveles en el canal de aducción | 54 |
| 3.4.1.4 | Diseño de la camara de recolección | 56 |
| 3.4.1.5 | Desagüe del caudal de excesos | 57 |
| 3.4.1.6 | Vertedero de excesos..... | 57 |
| 3.4.2 | Cantidades y precios de la captación | 60 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.4.3 | Diseño del desarenador..... | 62 |
| 3.4.3.1 | Carga hidráulica superficial | 62 |
| 3.4.3.2 | Teoría de la sedimentación | 63 |
| 3.4.3.3 | Cálculo de parámetros de sedimentación..... | 63 |
| 3.4.3.4 | Vertedero de salida | 65 |
| 3.4.3.5 | Pantalla de salida | 66 |
| 3.4.3.6 | Pantalla de entrada | 66 |
| 3.4.3.7 | Almacenamiento de lodos | 66 |
| 3.4.3.8 | Cámara de aquietamiento | 67 |
| 3.4.3.9 | Cantidades y precios del desarenador..... | 69 |
| 3.4.4 | Cantidad y precio de la conducción | 70 |
| 3.4.5 | Costo de la turbina | 71 |
| 3.4.6 | Costo de la casa de máquinas..... | 71 |
| 3.4.7 | Costo total del proyecto | 72 |
| 4. | CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES | 74 |
| 5. | REFERENCIAS | 75 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Procesos principales generadores de la precipitación (IDEAM, 2014) | 17 |
| Tabla 2 Clasificación de las PCH, según la CREG. sector eléctrico colombiano..... | 21 |
| Tabla 3 Elementos del centro de investigación | 23 |
| Tabla 4 Consumos en kWh..... | 26 |
| Tabla 5 Coordenadas zona de estudio | 28 |
| Tabla 6 Ubicación estaciones IDEAM, (IDEAM,2013)..... | 29 |
| Tabla 7 Diferencia de nivel y caudal para la obtención de 10 kW de potencia | 35 |
| Tabla 8 Caudales medios de las cuencas del río Otún y Chinchiná | 38 |
| Tabla 9 Caudales medios obtenidos por regionalización. | 38 |
| Tabla 10 Datos del aforo en campo | 39 |
| Tabla 11 cálculos para el aforo en campo..... | 41 |
| Tabla 12 Coordenadas aforo de campo..... | 42 |
| Tabla 13 Coordenadas del centro de investigación..... | 42 |
| Tabla 14 Resultados del cálculo de los elementos de la rejilla..... | 54 |
| Tabla 15 Cálculos canal de aducción..... | 55 |
| Tabla 16 Cálculos cámara de recolección | 56 |
| Tabla 17 Cálculos vertedero de excesos | 57 |
| Tabla 18 cuantías volumétricas, recuperado de (Cordero Bejarano, 2012)..... | 60 |
| Tabla 19 cantidades de concreto, acero y excavación de la captación | 60 |
| Tabla 20 Análisis unitario metro cúbico excavación, tomado de Tabla 19..... | 60 |
| Tabla 21 Análisis de precio unitario concreto, recuperado de (Camacol, 2016) | 61 |
| Tabla 22 Análisis de costos totales de la captación | 61 |

| | |
|---|----|
| Tabla 23 datos para el cálculo de los parámetros de sedimentación | 64 |
| Tabla 24 tiempo de asentamiento | 64 |
| Tabla 25 cantidades de concreto, acero y excavación desarenador | 69 |
| Tabla 26 Cantidades y precios del desarenador | 70 |
| Tabla 27 cantidad y precio conducción | 70 |
| Tabla 28 precio de la turbina seleccionada, recuperado de (Capua, Dzwonkoski, Harris, & Plummer, 2014) | 71 |
| Tabla 29 dimensiones de la turbina Hydro eKids recuperado de (Toshiba, 2016)..... | 72 |
| Tabla 30 Análisis unitario para cas de máquinas, recuperado de (Camacol, 2016) | 72 |
| Tabla 31 proyectos de micro generación similares recuperado de (Hokenson, Coultes, Fuller, & Neuberg, 2011) y (Capua et al., 2014)..... | 73 |
| Tabla 32 Costo total del proyecto | 73 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Ilustración 1 Río Claro y sus sub cuencas (GOTTA ingeniería, 2015)..... | 17 |
| Ilustración 2 Ubicación del observatorio tomada de Google Earth | 18 |
| Ilustración 3 Consumos hora a hora | 27 |
| Ilustración 4 Localización de la zona..... | 28 |
| Ilustración 5 Modelo Digital de Elevación..... | 29 |
| Ilustración 6 Raster de precipitación | 30 |
| Ilustración 7 Raster de evapotranspiración | 30 |
| Ilustración 8 Esquema de construcción del modelo hidrológico tomado de (Hernández, 2016) | 31 |
| Ilustración 9 Errores comunes en los MDE, modificado de (Hernández, 2016)..... | 31 |
| Ilustración 10 Cuenca de estudio sobre el mapa de acumulación de caudales, Recuperado de QGIS | 33 |
| Ilustración 11 Perfil energético en el tramo de estudio, extraído de QGIS | 36 |
| Ilustración 12 Propiedades de las cuencas de los ríos Otún y Chinchiná..... | 37 |
| Ilustración 13 Propiedades de la cuenca de estudio | 37 |
| Ilustración 14 definición de áreas parciales en la sección de aforo, recuperado de (Marbello, 1997, pág. 233) | 41 |
| Ilustración 15 Datos de la curva de duración de caudales | 44 |
| Ilustración 16 tipos de turbinas de Toshiba (Toshiba, 2016) | 46 |
| Ilustración 17 Información del proyecto óptimo en zona de estudio | 47 |
| Ilustración 18 Ubicación de la captación y la descarga del proyecto óptimo de la zona ... | 48 |
| Ilustración 19 Elementos de la captación recuperado de (López Cualla, 2003, pág. 94).. | 51 |
| Ilustración 20 Captación a través de la rejilla a canal de aducción, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 99) | 52 |
| Ilustración 21 Rejilla de recolección, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 100)..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 22 Niveles en el canal de aducción, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 101) | 55 |
| Ilustración 23 Detallado de la cámara de recolección, modificado de (López Cualla, 2003) | 56 |
| Ilustración 24 Diseño en planta de la captación, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 111) | 58 |
| Ilustración 25 Corte A-A captación modificado de (López Cualla, 2003, pág. 112) | 58 |
| Ilustración 26 Corte B-B de la captación, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 111) . | 59 |
| Ilustración 27 Corte C-C captación, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 112) | 59 |
| Ilustración 28 Zonas del desarenador, recuperado de (López Cualla, 2003)..... | 62 |
| Ilustración 29 vista en planta del desarenador, modificado de (López Cualla, 2003) | 68 |
| Ilustración 30 Corte A-A desarenador, modificado de (López Cualla, 2003) | 68 |
| Ilustración 31 Corte B-B desarenador, modificado de (López Cualla, 2003) | 69 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 Diferencia de nivel y caudal necesarios para la obtención de 10 kW de potencia | 34 |
| Gráfico 5 sección real del río Claro | 40 |
| Gráfico 3 Ciclo anual de caudales | 43 |
| Gráfico 2 Curva de duración de caudales | 44 |
| Gráfico 6 Perfil del río claro en zona de estudio..... | 48 |

RESUMEN

El presente trabajo plantea el diseño de una micro central hidroeléctrica en el Parque Nacional Natural Los Nevados, con el fin de abastecer un centro de investigación de la Universidad EIA. Para su concepción se realizará un estudio hidrológico que permita establecer el caudal de diseño de la central hidroeléctrica.

Se estableció el punto que brinde una mayor eficiencia en relación a la caída y al caudal que presenta la red de drenaje del río Claro. Se plantea el diseño de las obras civiles necesarias para el correcto funcionamiento de la central, respetando siempre los parámetros técnicos y legales que garanticen la sostenibilidad del proyecto.

El estudio culmina estableciendo los costos del proyecto incluidos sus costos de operación para una futura evaluación financiera que establezca la viabilidad de la central, basada en el presupuesto disponible del ente constructor.

Palabras clave: Río Claro, Parque Natural Los Nevados, Micro central hidroeléctrica, Observatorio Poleka Kasué

ABSTRACT

The present work proposes the design of a micro hydroelectric power station in the Natural National Park Los Nevados, in order to supply power to a research center of the EIA University. For its conception, a hydrological study will be carried out to establish the design flow of the hydroelectric power station.

The point that provides greater efficiency in relation to the fall and the flow of the drainage network of the Claro river is established. The design of the civil works necessary for the correct operation of the plant will be considered, always respecting the Technical and legal parameters that guarantee the sustainability of the project.

The study culminates in establishing the costs of the project including its operating costs for a future financial evaluation that establishes the feasibility of the plant, based on the available budget of the construction company.

Keywords:

Claro River, Natural National Park Los Nevados, micro hydroelectric power station, Poleka Kasué Observatory

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo plantea la factibilidad de una micro central hidroeléctrica en alta montaña, enfocado específicamente en el Parque Natural Nacional Los Nevados. El motivo del mismo se basa en la idea de que la universidad EIA, en conjunto con el observatorio Poleka Kasué; proponen un centro de investigación físico en el sitio, con el fin de poder hospedar investigadores que continúen realizando el trabajo que se viene realizando desde hace 9 años.

Para que el centro de Investigación sea funcional, requiere de energía eléctrica, pero la zona no cuenta con cobertura de la red nacional de energía. Para solucionar esto, se analiza una micro central hidroeléctrica que supla la demanda necesaria. La idea es que sea un sistema de captación a filo de agua, con el fin de no tener que realizar embalses dentro de la cuenca; esto debido a dos razones, la primera, es que se quiere afectar en la menor forma posible las condiciones ecológico-ambientales del cauce; la segunda, es que históricamente se ha evidenciado que el hecho de requerir un embalse aumenta los costos de construcción de la hidroeléctrica.

En la zona se ha realizado un estudio durante ya 9 años, en los cuales la universidad en conjunto con diferentes grupos de investigación y entidades privadas, ha logrado comenzar a tener un panorama de lo que está sucediendo en los páramos del trópico, enfocado fundamentalmente al Parque Natural Nacional Los Nevados. El estudio tiene siete componentes de análisis propuestos con el fin de evaluar las condiciones de la zona; estos siete componentes son:

Cambios de largo plazo en la estabilidad de la atmosfera: un calentamiento acelerado de la troposfera superior tropical, empeora la ya rápida contracción de los glaciares de montañas tropicales y altera las dinámicas de circulación local, es por esto que la investigación se centra en la comprensión de los impactos potenciales de los procesos de cambios convectivos entre los 4.000 y 4.500 m de gradientes altitudinales de los andes tropicales (Ruíz, Gutiérrez, & Ortega, 2016).

Diagnóstico del balance de agua y cambios potenciales en los regímenes hidrológicos: se está estudiando la respuesta eco-hidrológica de las cuencas de montaña a cambios de largo plazo de las condiciones climáticas. Para tal estudio se seleccionaron dos vertientes claves de Colombia, como lo son el río Claro y el río Otún, ambos situados en el flanco occidental del macizo volcánico El Ruiz-Tolima, en la cordillera central. El análisis busca detectar registros anómalos, tendencias de largo plazo y cambios abruptos en la media y la varianza de series temporales históricas, utilizando el registro de estaciones meteorológicas (Ruíz et al., 2016).

Evaluaciones de los niveles y vulnerabilidades de la biodiversidad: la investigación integra diferentes escalas ecológicas (desde el enfoque general del ecosistema, hasta el nivel específico de la especie) y múltiples enfoques metodológicos (desde modelización geográfica, hasta observaciones in situ y monitoreo a largo plazo). Los resultados proporcionan información inmediata sobre posibles respuestas al cambio climático. Sin embargo, la respuesta real de la vegetación (o del ecosistema) puede diferir de las proyecciones de lo modelado (Ruíz et al., 2016).

El papel y el alcance de las perturbaciones antrópicas: en los últimos años los casos de incendios se han incrementado, principalmente por 3 factores: el más importante es la actividad humana, le sigue el cambio climático y finalmente la poca capacidad de reacción de las entidades gubernamentales ante este tipo de episodios. El trabajo en este aspecto se centra en la comprensión del lento tiempo de recuperación de los ecosistemas de páramo, observando varios lugares que fueron afectados por pequeños incendios a gran altitud. (Ruíz et al., 2016)

La captura y almacenamiento de carbono en los suelos, los humedales y micro hábitats acuáticos: los suelos y las turberas en los ecosistemas de gran altitud sirven como sumideros de carbono debido a la mineralización lenta y las tasas de descomposición causadas por condiciones ambientales específicas como la reducción de la disponibilidad de oxígeno, baja presión y bajas temperaturas. Adicionalmente, la presencia de erupciones volcánicas genera capas de ceniza que entierran el material orgánico, es por esto que el objetivo del equipo es cuantificar la cantidad de carbono almacenado en los sumideros. Esta información será útil para determinar las tasas de acumulación de carbono en los suelos y la posible liberación de carbono bajo diferentes escenarios de presión ambiental. (Ruíz et al., 2016)

Los cambios a largo plazo en las condiciones climáticas: como parte de una investigación más amplia sobre el papel de los trópicos en el clima global, el grupo local, se asoció con investigadores de la Universidad de Maine, para estudiar el registro geológico de la glaciación de los Andes septentrionales, con el fin de evaluar la variabilidad del clima tropical de los últimos ~ 20.000 a 30.000 años. Se han estado estudiando escombros glaciares no consolidados y otras formaciones geológicas que puedan mantener un registro del momento y la magnitud de los avances glaciares pasados. Las actividades del trabajo de campo implican la cartografía detallada de formas de relieve glaciares y la colección de muestras de varias morrenas para la datación de la superficie en exposición. La investigación proporcionará una contraparte del hemisferio norte, a los conjuntos de datos existentes de los Andes peruanos, y apoyará los proyectos de investigación en curso en Colombia que investigan el derretimiento rápido de los glaciares de montaña (Ruíz et al., 2016)

La integración socio económica: para evaluar la integridad de los ecosistemas de alta montaña en los Andes, el equipo multidisciplinario ha desarrollado un sistema de monitoreo que integra múltiples campos temáticos, incluyendo la evaluación socioeconómica. La valoración económica de estos ecosistemas es el siguiente paso: un tema adicional y transversal dentro de nuestro sistema destinado a identificar las preocupaciones más frecuentes de múltiples actores. De esta manera, se espera vincular con éxito el papel como investigadores a los intereses y preocupaciones de las comunidades, e informar a los responsables políticos, con el fin de contribuir a la construcción social y la apropiación del conocimiento. (Ruíz et al., 2016)

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Contexto y caracterización del problema

La Universidad EIA, desde hace 9 años, se encuentra estudiando los ecosistemas de alta montaña del Parque Nacional Natural Los Nevados en los departamentos de Tolima, Risaralda y Caldas. La razón por la cual se está estudiando la zona es que, debido a un calentamiento en la troposfera alta, que se ve más elevada en los trópicos, el nivel de convección libre está teniendo numerosos impactos negativos en la distribución altitudinal de precipitación de sólidos y líquidos en las cuencas andinas de gran altitud tropical, y en consecuencia sobre la integridad general de los ambientes de páramo. (Ruíz Carrascal, Charla sobre importancia del estudio de la alta montaña en el trópico, 2016)

El Observatorio de Montaña “Poleka Kasué”, que forma parte de la Red Mundial de Observatorios de montaña - GNOMO, se encuentra en la cuenca del Río Claro. El área protegida cubre el rango de altitud de 2.600 a 5.300 msnm, y proporciona un hábitat a los altos bosques, páramos, dos altas montañas de los Andes cubiertos de nieve con campos de nieves efímeras, y tres picos helados. (Ruíz Carrascal, Gutiérrez Lagoueyte, & Ortega Arango, 2015) los datos recolectados del observatorio y de los sensores en el Parque Nacional Los Nevados son los siguientes:

- Estaciones hidroclimatológicas y estaciones de caudal presentes en la zona.
- U23-001 HOBO® registradores de temperatura cerca de la superficie, la humedad relativa y punto de rocío de datos, desplegados a lo largo de un gradiente altitudinal entre 1.610 -4.890 msnm
- Observaciones complementarias sobre el terreno de fusión de la capa de nieve y agua de la laguna de almacenamiento, la precipitación horizontal, y la retención de agua en la vegetación de páramo.
- Parámetros biológicos (índices de diversidad, composición de especies, abundancia) de parcelas de vegetación experimentales.
- La ocupación del suelo, uso del suelo y mapas de ecosistemas basados en fotointerpretación y los parámetros físicos.

Para la realización del estudio, la universidad en convenio con ISAGEN y el IDEAM cuenta con estaciones meteorológicas, sensores de temperatura y pluviosidad. Estos sensores y estaciones registran datos las 24 horas del día, los cuales se van almacenando en sus propias memorias. El grupo de investigación debe frecuentar el lugar trimestralmente para descargar los datos de los sensores y para realizar mantenimientos con el fin de que los equipos puedan seguir grabando datos.

Es por esto que la Universidad planteó la posibilidad de crear un centro de alojamiento e investigación en alta montaña, donde los investigadores y estudiantes tengan la posibilidad de tener un espacio el cual cubra las necesidades básicas, tanto para su alojamiento, como para los equipos de investigación. En consecuencia, hay motivos que impulsan la generación de energía limpia para este centro de investigación. Con el fin de aprovechar los afluentes de la zona se plantea el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica para el correcto funcionamiento del centro. La necesidad de generación de energía en el sitio se hace necesaria debido a que se encuentra alejada de la zona urbana, por tal motivo la transmisión hasta dicho punto sería costosa, además de que las empresas prestadoras de este servicio no verían la oportunidad de llevar energía a la alta montaña como algo benéfico, ya que la zona es despoblada y no sería rentable.

Para este caso se plantea una Micro Central a filo de agua. Lo que quiere decir que no se construirá presa para el sistema de captación. Existen varias razones para optar por este tipo de central. La primera, es que se busca minimizar el impacto ecológico, debido a que se ha evidenciado en estos proyectos una mayor afectación al ecosistema. No solo se inundan zonas donde viven diferentes especies de fauna y flora, sino que se alteran las condiciones mismas del río. El transporte de sedimentos y la migración de especies para la reproducción son ejemplos de las condiciones ambientales afectadas con el represamiento. No quiere decir que con las centrales de derivación o filo de agua no afecten en lo absoluto las condiciones naturales de un ecosistema. Cualquier intervención humana trae consigo cambios en el entorno afectado. Sin embargo, se logra identificar que el daño ocasionado es significativamente menor. (Universidad EIA, 2009)

En la zona el recurso hídrico es muy abundante, esto se debe a que en el trópico la precipitación que se presenta es alta. Principalmente por fenómenos atmosféricos que son afectados por la distribución topográfica y la vegetación de la superficie. En la Tabla 1 se pueden apreciar los distintos fenómenos que afectan la precipitación en la zona. Adicionalmente en la Ilustración 1 se muestra la cuenca del Río Claro y sus sub-cuencas. Allí se ve evidenciado que la zona cuenta con gran riqueza hídrica que se puede aprovechar para la generación de energía eléctrica, esto sumado a los cambios de altura por la topografía de la zona.

Un factor determinante en el proyecto será el acceso a la zona, esto debido a que las vías de acceso no son ni vías primarias ni secundarias, por el contrario, gran parte del recorrido es en afirmado y se necesitan vehículos con características especiales para alcanzar el punto donde será el centro de investigación; el uso de estos vehículos incrementa los costos, por lo cual se buscó que su uso fuera el menor posible, buscando siempre la viabilidad de la central.

Tabla 1 Procesos principales generadores de la precipitación (IDEAM, 2014)

| Procesos Generadores de Precipitación | |
|---------------------------------------|--|
| 1. | La zona de convergencia Intertropical - ZCIT |
| 2. | Sistemas de Alta Presión |
| 3. | Ondas del Este del Caribe |
| 4. | Vaguadas de latitudes medias |
| 5. | Características de mesoescala |
| 6. | Ciclones Tropicales |
| 7. | Vaguada tropical de la alta tropósfera – (TUTT) |
| 8. | La Zona de Convergencia del Atlántico Sur – ZCAS |
| 9. | Baja anclada de Panamá |
| 10. | Corrientes en chorro |
| 11. | Frentes Fríos |

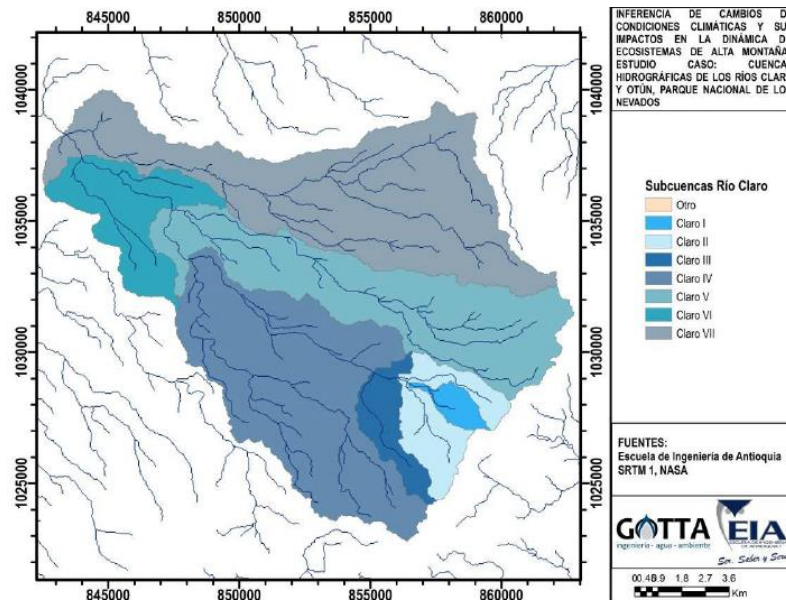


Ilustración 1 Río Claro y sus sub cuencas (GOTTA ingeniería, 2015)

1.1.2 Ubicación tentativa del centro de investigación

El observatorio socio-ecológico de montaña como sitio experimental, se ha propuesto como punto de cierre, aproximadamente a la altura del lugar llamado La Pica, este se puede apreciar en la Ilustración 2. Desde este lugar hacia arriba estaría ubicado el observatorio, el motivo por el cual se escoge La Pica como lugar de inicio, es fundamentalmente porque allí se encuentra el mayor avance de las masas glaciares que se considera ha ocurrido desde el pico de la última glaciación en la cuenca del río Claro; en el sitio conocido como La Cueva, se cree que se tienen avances de masas glaciares de aproximadamente 10.000 a 12.000 años atrás del presente (Ruíz, 2016).

Es por esto que se desea ubicar el centro de investigación en este sector. Por consiguiente, el punto de captación debería estar ubicado aguas abajo del sitio conocido como La Cueva. Como se puede apreciar en la Ilustración 2, aguas abajo de La Cueva, hay un punto de congruencia de 3 afluentes, lo cual da una primera idea de un sitio adecuado para la captación de la Micro Central. Una posible localización del sitio se ha marcado en dicha ilustración con el nombre Ubicación tentativa. Los marcadores amarillos que se pueden apreciar son puntos de referencia del observatorio Poleka Kasué. Los demás puntos son referencias espaciales de Google Earth. Estas ubicaciones se activan con el fin de ayudar al lector a ubicarse espacialmente en el sitio del estudio.



Ilustración 2 Ubicación del observatorio tomada de Google Earth

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Establecer la viabilidad de una Micro Central hidroeléctrica en alta montaña, en la cuenca del Río Claro, que supla las necesidades de demanda de un centro de alojamiento para investigadores.

1.2.2 Objetivos Específicos

Establecer la demanda necesaria del centro de investigación en términos de energía y potencia eléctrica.

Realizar un estudio hidrológico de la zona para cuantificar el recurso hídrico existente para la generación de energía.

Definir el potencial hidroeléctrico de la zona y las zonas de captación y descarga del proyecto

Escoger la tecnología de generación hidroeléctrica de energía más apropiada y diseñar conceptualmente las obras civiles

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 Marco Contextual

Para el caso de análisis particular de este trabajo, se tiene como hipótesis que la potencia de la turbina del centro de investigación, no será mayor a 1 MW, esto debido a que los consumos energéticos de una instalación de estas especificaciones, no requiere mayores potencias. El trabajo de grado de Arango y Maya (2015) que habla sobre micro generación hidroeléctrica, se basa en estudios sobre generación a potencias menores de 1 MV como es el caso del proyecto que se plantea desarrollar. El trabajo de grado anteriormente mencionado se tomará como base, en particular para la selección de la turbina, que es pieza clave del proyecto y define numerosos parámetros del mismo. (ARANGO ARBELÁEZ & MAYA RUIZ, 2015)

Por otra parte, (Madrid, Toro, & Ortega, 2015) realizaron el planteamiento de centrales hidroeléctricas con tornillos hidrodinámicos, este caso particular es utilizado cuando no se cuenta con una caída de agua considerable y el caudal oscila entre los 0.7 y 8.0 m^3/s . Aunque su uso se ve muy limitado debido a las condiciones técnicas que se mencionan, es posible que sea una solución viable, en caso de encontrar caudales en el intervalo establecido y con la caída necesaria.

En el presente trabajo, se hace uso de la investigación realizada por S.J. Williamson, B.H. Stark, J.D. Booker: en su artículo "Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis" el cual establece un método para la selección de turbinas de baja cabeza

de presión, ya que cuando se tiene micro generación las variables que determinan la selección de la turbina varían considerablemente respecto a las de gran generación (Williamson, Stark, & Booker, 2014).

La empresa GOTTA realizó un estudio en el año 2015 en el cual se presentan los resultados definitivos de la componente de modelación hidrológica distribuida del proyecto “Inferencia en cambios de condiciones climáticas y sus impactos en la dinámica de ecosistemas de alta montaña” (GOTTA ingeniería, 2015). El estudio de caso analizó las cuencas de los ríos Claro y Otún del Parque Nacional Natural Los Nevados; los datos encontrados por parte de esta compañía, y los datos obtenidos de las estaciones del IDEAM, fueron la base para generar las series de caudales que permitan tener el caudal, punto a punto, en un tramo del río. El estudio tenía como objetivo los siguientes parámetros:

- Caracterización morfométrica de las cuencas de estudio.
- Procesamiento y análisis de la información hidroclimática.
- Estimación de los campos de precipitación y evapotranspiración media anual.
- Realización de los balances hidrológicos de largo plazo.
- Implementación de modelos hidrológicos distribuidos para las cuencas de análisis.

El Ingeniero Ricardo Hernández en su tesis de maestría, desarrollo una plataforma dentro del programa QGIS en donde se busca optimizar la búsqueda de centrales hidroeléctricas mediante sistemas de información geográficos (SIG). Esta herramienta significó un gran aporte al presente trabajo pues facilitó de manera considerable la localización de la central. La plataforma está orientada a identificar proyectos con base en unas condiciones de frontera suministradas por el usuario. para su uso fue necesario el modelo digital de elevación, la precipitación y la evapotranspiración de la zona; los datos mencionados anteriormente fueron suministrados por el observatorio Poleka Kasué.

1.3.2 Marco teórico

La generación de energía por medio de hidroeléctricas fue una de las primeras formas de producir energía de la humanidad. Actualmente es la segunda fuente de generación en orden de importancia y la más generalizada para obtener energía eléctrica (Sierra Vargas, Sierra Alarcon, & Guerrero Fajardo, 2011)

El proceso que realiza la central hidroeléctrica es convertir la energía potencial del agua en energía cinética, esto a su vez genera un trabajo en la turbina y se transforma en energía eléctrica.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas se conocen por ser sistemas de generación con capacidad hasta de 10 MW. A partir de la energía del flujo del agua y generalmente con pequeños cambios de altura, abastecen pequeñas comunidades humanas (Sierra Vargas et al., 2011). La generación por medio de pequeñas centrales hidroeléctricas suele darse

para abastecer zonas aisladas de la población, donde el costo de llevar líneas de transmisión del sistema eléctrico general suele ser elevado (Demetriades, 2000).

En la Tabla 2 se puede apreciar que, según la CREG, el proyecto planteado en este trabajo, encaja dentro del término de micro central.

Tabla 2 Clasificación de las PCH, según la CREG. sector eléctrico colombiano

| Potencia | Tipo |
|----------------|-----------------|
| 0-100 kW | micro central |
| 100-1000 kW | Mini central |
| 1000- 10000 kW | Pequeña central |

1.3.2.1 Cálculo de la potencia de una central hidroeléctrica

El potencial hidroeléctrico depende de diversos factores como lo es el caudal de la fuente hídrica, la cabeza de altura y condiciones geológicas propicias. La combinación favorable de las anteriores condiciones, generan un lugar atractivo de generación (ARANGO ARBELÁEZ & MAYA RUIZ, 2015a)

La siguiente ecuación muestra el cálculo de la potencia de una central hidroeléctrica.

$$P = \gamma * Qd * Hn * \eta$$

Donde:

P: potencia de la central hidroeléctrica

γ : Peso específico del agua

Qd: caudal de diseño

Hn: altura desde captación hasta el sitio de generación

η : eficiencia del sistema

La energía utilizable puede definirse como la relación entre la energía útil y la energía invertida. Por lo tanto, la energía que se puede aprovechar es menor que la energía real del agua. En el proceso de generación, cada elemento posee diferente eficiencia. (ARANGO ARBELÁEZ & MAYA RUIZ, 2015)

1.3.2.2 Energía

La energía es el resultado de multiplicar una potencia por un tiempo; para el cálculo de la energía de una central hidroeléctrica lo normal es encontrar la generación en unidad de kWh/año y se obtiene de la siguiente manera

$$E = Pi * 365 * 24 * FP$$

Donde:

E: Energía media generada por año (kWh/año)

Pi: potencia instalada de la central

FP: factor de planta

1.3.2.3 Energía firme

La energía firme es un concepto que desarrolló el gobierno colombiano con el fin de garantizar la confiabilidad en el suministro de energía a largo plazo; se define como la energía que se puede producir el 95% del tiempo.

1.3.2.4 Caudal ecológico

El IDEAM ha adoptado como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio, según la resolución 865 del 22 de julio de 2004.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada para desarrollar el proyecto, como trabajo de carácter exploratorio, se divide en las siguientes etapas:

2.1 ETAPA 1. ESTABLECIMIENTO DE LOS CONSUMOS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN.

En esta etapa se analizaron en primera instancia los elementos que consumirían energía eléctrica en el centro de investigación. Se estableció que todos los electrodomésticos debían funcionar con energía eléctrica para el correcto funcionamiento del centro. A continuación, en la Tabla 3 se muestran los elementos que hicieron parte del análisis junto con sus consumos, dicha información es de elaboración propia, pero cubre una gama lo más alta posible de consumos en el centro.

Tabla 3 Elementos del centro de investigación

| Elemento | Potencia(w) | Consumo(kWh) |
|-----------------------|--------------|---------------|
| Lavadora secadora | 1300 | 1.300 |
| Nevera- Congelador | 132 | 0.132 |
| Horno | 1500 | 1.500 |
| Fogón eléctrico | 3300 | 3.300 |
| Horno muestras | 2500 | 2.500 |
| Bombillos led (x15) | 45 | 0.045 |
| Televisor | 170 | 0.170 |
| Video beam | 498 | 0.498 |
| Computadores (x2) | 26 | 0.026 |
| Calentador | 1400 | 1.400 |
| Licuada | 700 | 0.700 |
| Celulares (x10) | 150 | 0.150 |
| Play Station 4 | 250 | 0.250 |
| Freezer Pequeño | 67 | 0.067 |
| Radio central | 10 | 0.010 |
| Radios de campo (x 6) | 30 | 0.030 |
| TOTAL | 12078 | 12.078 |

La selección de estos elementos fue elaborada consecuentemente con las necesidades que presentarían los investigadores una vez en el sitio.

Posteriormente se determinó las horas del día en las que estarían encendidos los elementos ya mencionados, con el fin de establecer la demanda pico, de tal forma que se pudiera establecer la energía necesaria para que el centro fuese funcional en todo momento. Las explicaciones del proceso de selección de los elementos del centro se destacan en el siguiente capítulo.

2.2 ETAPA 2. ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA ZONA Y CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

En esta etapa se trabajó de forma paralela entre la información que se extrajo del IDEAM y del estudio de GOTTA, junto con los resultados arrojados por el programa QGIS, fundamentalmente por lo siguiente: del IDEAM se obtuvieron dos series de caudales, cada una de ellas de una cuenca diferente. Una de las cuencas, la del Río Chinchiná, presentaba caudales medios diarios, mientras que la otra, la del Río Otún presentaba caudales medios mensuales.

Se hace uso de la herramienta Energis, elaborada por Hernández en su tesis de maestría. Energis es una serie de complementos que se le instalan al programa Qgis. Dichos complementos fueron elaborados con el fin de establecer zonas óptimas, para el desarrollo de centrales hidroeléctricas.

Del IDEAM se contaba con dos series de caudales como se mencionó anteriormente. Sin embargo, se debe de seleccionar una de las dos series para el desarrollo del trabajo. Debido a que cada serie de caudales está relacionada con una cuenca en particular, se realizará una regionalización con cada una de ellas y se obtendrá un caudal medio para la cuenca de estudio.

Al llegar a este punto se encontró con un inconveniente, puesto que al realizar la regionalización con ambas series de caudales la diferencia entre los caudales medios era de aproximadamente el doble para la cuenca de estudio. En ese momento se optó por analizar los datos arrojados por QGIS, los cuales, basados en el balance hídrico de largo plazo, muestran pixel a pixel el caudal acumulado; posteriormente se identificó que el caudal medio proveniente de los datos del Río Otún, tenía mucha mayor relación con el caudal medio que arrojaba el programa, a diferencia de los datos obtenidos por la estación del Río Claro.

Para poder obtener una serie de duración de caudales se realiza un proceso estadístico llamado normalización de datos. Este proceso consiste en tomar cada dato y restarle la media, al resultado obtenido dividirlo por la media. Al hacer esto con cada uno de los datos se obtiene una nueva serie centrada en cero. Para llevar esta serie a la serie de caudales que se desea obtener, se realiza el proceso inverso. Se multiplica cada valor por el caudal medio de la cuenca de estudio y al resultado se le suma el valor del caudal medio. Debido a que el caudal medio de la cuenca de estudio, arrojado por los datos del río Otún es el más indicado para hacer la normalización, se procede con dicho dato. Sin embargo, se utiliza la serie de caudales del río Chinchiná, ya que presenta información diaria, mientras que los

datos del río Otún se presentan de forma mensual. Todo esto asumiendo rendimientos hídricos constantes a lo largo de ambas cuencas.

Finalmente, con la ayuda del programa QGIS se estableció el punto de captación y el punto de descarga, como también el cambio de altura entre los dos puntos, lo cual permitió calcular la distancia de la tubería de conducción y la ubicación de las distintas obras civiles.

2.3 ETAPA 3. ESTABLECIMIENTO DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO EN LA ZONA.

Una vez establecido el punto de captación, se seleccionó un tramo del Río Claro, aguas arriba y aguas abajo del punto de captación, con el fin de establecer el potencial máximo que tiene el río en esa zona. Para ello, se utilizó el programa desarrollado por Hernández, Energis, el cual le pide al usuario que ingrese dos puntos de una corriente y le establezca ya sea, una potencia mínima o una conducción máxima. Los datos toman como punto de partida la generación con el caudal medio del río y buscan las condiciones óptimas de generación. Esto dependiendo de las condiciones ingresadas por el usuario, las cuales pueden ser, la priorización de la potencia o la optimización de la conducción.

2.4 ETAPA 4 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA Y DISEÑO CONCEPTUAL DE OBRAS CIVILES.

Para esta etapa se buscó en la web diferentes proveedores de Micro Plantas de generación hidroeléctrica que cumplieran con las condiciones y especificaciones que se fueron encontrando en los cálculos.

Para los diseños de las obras civiles, tanto del desarenador, de la captación y de la conducción se siguió lo establecido en el libro Elementos de diseño para acueductos y alcantarillado de Ricardo Alfredo López Cualla; una vez realizado el dimensionamiento se procedió a calcular las dimensiones de las estructuras para posteriormente realizar el cálculo del precio. Para los datos de los precios se utilizó un análisis de precios unitarios-APU que ofrece la Cámara Colombiana De La Construcción.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 ESTABLECIMIENTO DE CONSUMOS Y DEMANDAS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN.

Para la selección de los elementos que tendría el centro de investigación se hace una separación de las necesidades que se generan en el centro, para esto se tiene que: para el tema de la alimentación se tienen los siguientes elementos básicos: nevera-congelador, horno y fogón eléctrico. Para el tema de aseo se tiene lo siguiente: lavadora-secadora y calentador para las duchas. Para el tema de investigación se tienen los siguientes elementos: horno de muestras, video beam, computadores, celulares, radio central, radios de campo y un congelador pequeño. Para la iluminación se estimó que se necesitarían unos 15 bombillos. Finalmente, para el entretenimiento de los investigadores se establece: televisor y Play Station. Una vez establecidos los elementos eléctricos que harían parte del centro de investigación se procedió a buscar su consumo máximo, con el proveedor de cada uno de ellos, la información se presenta en la Tabla 4

Tabla 4 Consumos en kWh

| Elemento | w | horas uso/día | horas por semana | Wh/mes | kWh/mes |
|---------------------|------|------------------|------------------|--------|---------------|
| Lavadora secadora | 1300 | 3 | 12 | 15600 | 15.60 |
| Nevera- congelador | 132 | 8 | 56 | 29568 | 29.57 |
| Horno | 1500 | 0.5 | 3.5 | 21000 | 21.00 |
| Fogón eléctrico | 3300 | 2 | 14 | 184800 | 184.80 |
| Horno muestras * | 2500 | 24 | 48 | 480000 | 480.00 |
| Bombillos led (x15) | 45 | 7 | 49 | 8820 | 8.82 |
| Televisor | 170 | 6 | 56 | 38080 | 38.08 |
| Video beam | 498 | 2 | 8 | 3984 | 3.98 |
| 2 computadores | 26 | 4 | 28 | 2912 | 2.91 |
| Calentador | 1400 | 1 | 7 | 39200 | 39.20 |
| Licuada | 700 | 0.25 | 1.75 | 4900 | 4.90 |
| Celulares(x10) | 150 | 8 | 56 | 33600 | 33.60 |
| Play Station 4 | 250 | 3 | 21 | 21000 | 21.00 |
| Congelador pequeño | 67 | 8 | 56 | 15008 | 15.01 |
| Radio central | 10 | 24 | 576 | 23040 | 23.04 |
| Radios de campo x 6 | 30 | 3 | 21 | 2520 | 2.52 |
| TOTAL | | | | | 924.03 |

(*) Se considera que el horno de muestras se utiliza dos veces a la semana, dejando las muestras de un día para otro.

Posteriormente se pasó a evaluar el consumo en cada hora del día, con el fin de conocer la hora pico o de máximo consumo. Dicho dato definirá la potencia necesaria para abastecer el centro de investigación. En esta parte se evaluó qué elementos de los mostrados en la Tabla 4 estaban encendidos en intervalos de una hora, dichos datos se graficaron y los resultados se pueden apreciar en la Ilustración 3. Como se puede apreciar el consumo máximo se encuentra entre las 19:00 y las 20:00 con un consumo de 8.48 kWh, basado en esto se establece que se generará para una potencia de 10 kW, aunque este dato sobredimensionaría la micro central, se realizará de esta manera como un factor de seguridad por si en algún momento se supera la demanda pico por cualquier motivo; de este modo se evita tener que contar con un sistema de baterías el cual incrementaría los costos.

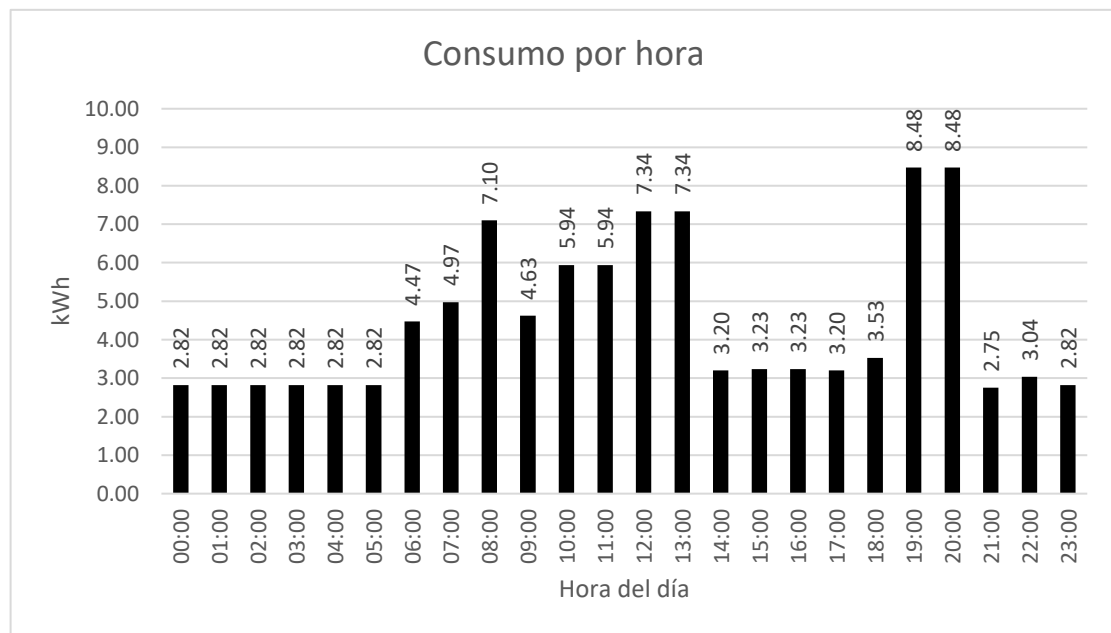


Ilustración 3 Consumos hora a hora

De la Ilustración 3 se puede apreciar que los mayores consumos de energía están alrededor de las horas de las principales comidas del día. El mayor consumo se ve en las horas de la noche, debido a que además de tener un pico por el consumo de alimentos, gran parte de la iluminación está encendida. Adicionalmente por ser una hora de descanso los elementos de entretenimiento suman al consumo de energía.

3.2 ESTUDIO HIDROLÓGICO

3.2.1 Zona de estudio



Ilustración 4 Localización de la zona

La zona está ubicada en la alta montaña del nevado del Ruiz, aproximadamente a 3450 msnm. Las coordenadas de la captación se muestran en la Tabla 5. La cuenca se localiza aguas abajo de la confluencia de tres corrientes, con el fin de aprovechar el caudal acumulado para la generación. El sistema de proyección de coordenadas es: Zona Bogotá Colombia. La localización se muestra en la Ilustración 4.

Tabla 5 Coordenadas zona de estudio

| Coordenada Este | Coordenada Norte |
|-----------------|------------------|
| 853041.4 | 1030426.4 |

3.2.2 Información disponible

Para el estudio hidrológico se utilizaron los siguientes datos: raster de precipitación, raster de evapotranspiración, modelo digital de elevación, además de las series de caudales del IDEAM de dos estaciones, las cuales se presentan en la Tabla 6. Como se puede apreciar las estaciones se encuentran en distintos departamentos y están a diferentes alturas, por lo que cada una de sus cuencas brinda información diferente al análisis.

Tabla 6 Ubicación estaciones IDEAM, (IDEAM,2013)

| Corriente | Nombre de Punto o Estación | Nombre Departamento | Nombre Municipio | Longitud | Latitud | Altitud |
|-----------|----------------------------|---------------------|------------------|-----------|---------|---------|
| Otún | La bananera (26137110) | Risaralda | Pereira | -75.63275 | 4.77378 | 1550 |
| Chinchiná | El Retiro (26157020) | Caldas | Palestina | -75.67111 | 5.12667 | 845 |

La Ilustración 5 muestra el modelo digital de elevación de la zona. Aunque la cuenca de estudio es más pequeña, se optó por trabajar con el MDE completo, lo cual resultó útil pues posteriormente se hizo el trazado de la cuenca de los Ríos Chinchiná y Otún cuyas coordenadas se pueden apreciar en la Tabla 6. estas estaciones tienen una distancia considerable entre ellas y el hecho de haber contado con un MDE de este tamaño permitió apreciar las condiciones físicas de la región, lo cual favoreció el procesamiento del resultado entre ambas cuencas y la cuenca de estudio. Los datos de precipitación presentados en la Ilustración 6 y los datos de evapotranspiración de la Ilustración 7 fueron procesados sobre el MDE en el programa QGIS, esto con el fin de realizar el balance hídrico de largo plazo en la zona.

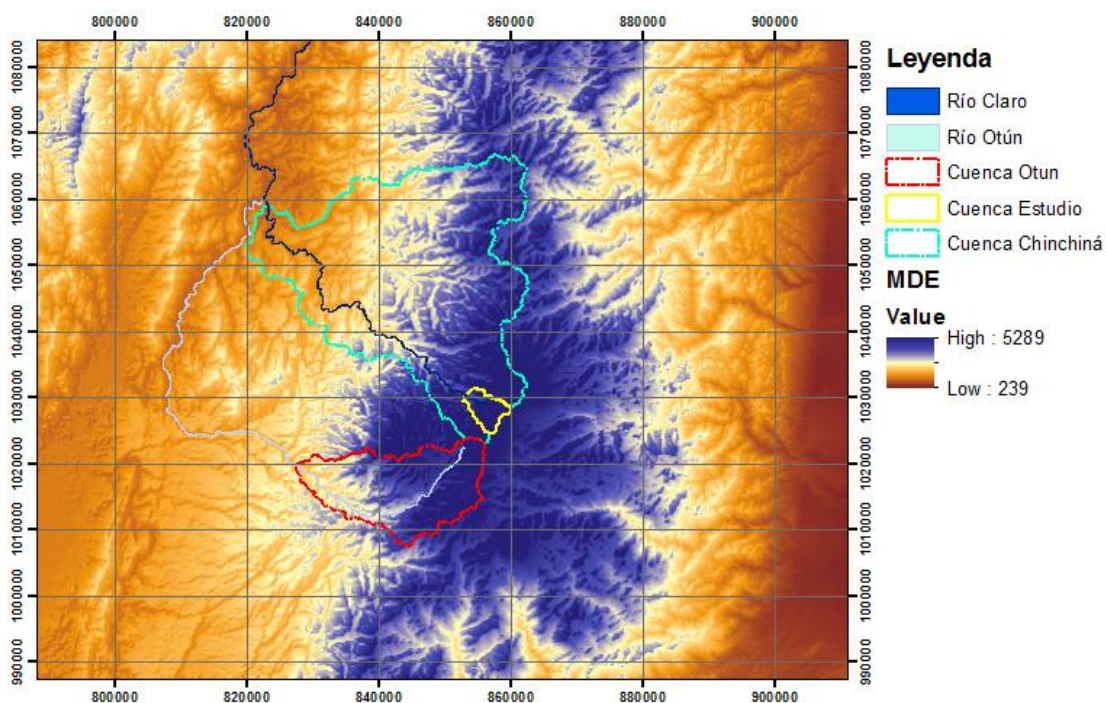


Ilustración 5 Modelo Digital de Elevación

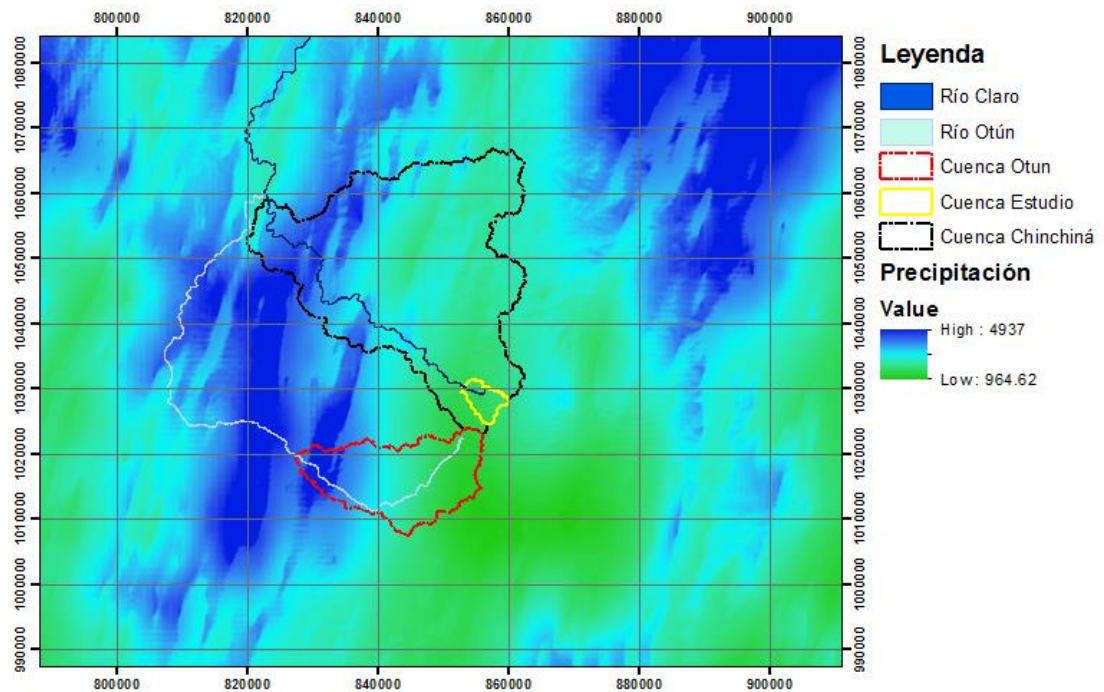


Ilustración 6 Raster de precipitación

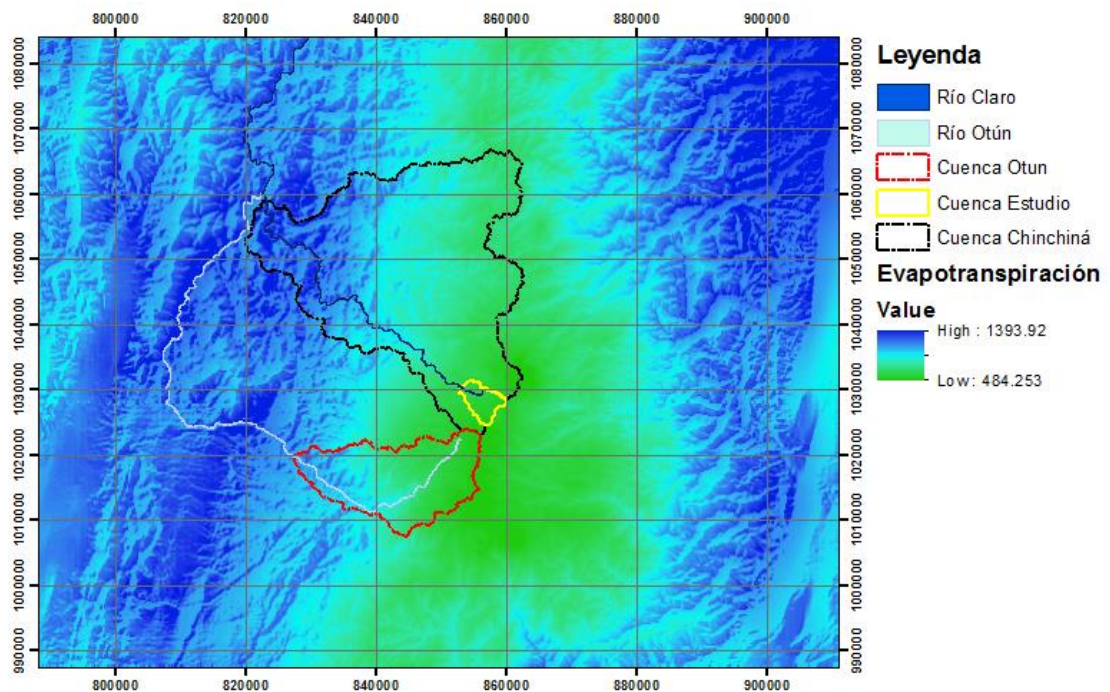


Ilustración 7 Raster de evapotranspiración

Con el fin de desarrollar el modelo hidrológico se siguió la metodología desarrollada por Hernández, un esquema del proceso a desarrollar se puede apreciar en la Ilustración 8.

Para el caso de estudio en particular no se requiere de datos de temperatura y radiación, ya que finalmente lo que se quiere obtener son datos de caudales punto a punto con la respectiva altura.

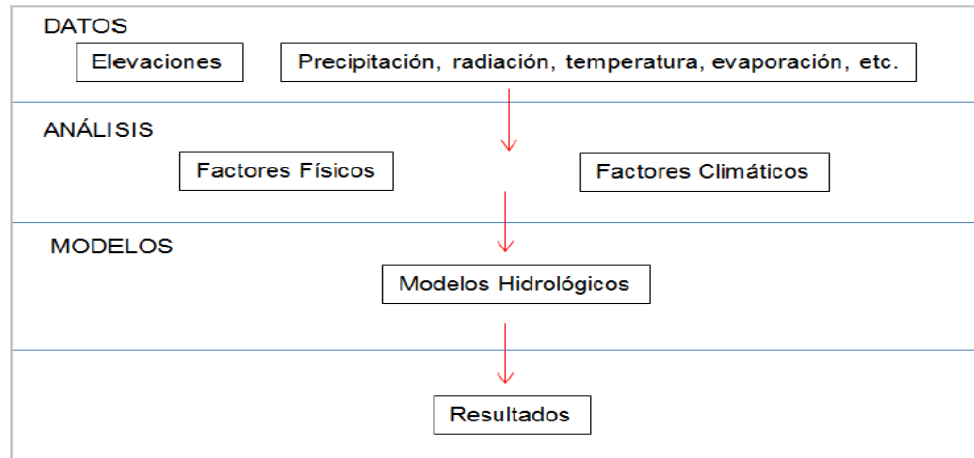


Ilustración 8 Esquema de construcción del modelo hidrológico tomado de (Hernández, 2016)

3.2.3 Modelación en QGIS

El primer paso a seguir fue la corrección del mapa de elevación. Para poder realizar el procesamiento de la información se deben hacer correcciones en el modelo digital de elevación. Estos archivos generalmente vienen con errores por defecto, por lo tanto, el programa pre procesa la información en búsqueda de errores. Una vez encontrados, los corrige y entrega al usuario un modelo digital de elevación corregido (Arango Hernández, 2016). La Ilustración 9 Muestra algunos de los errores más comunes que se pueden encontrar al procesar los MDE.

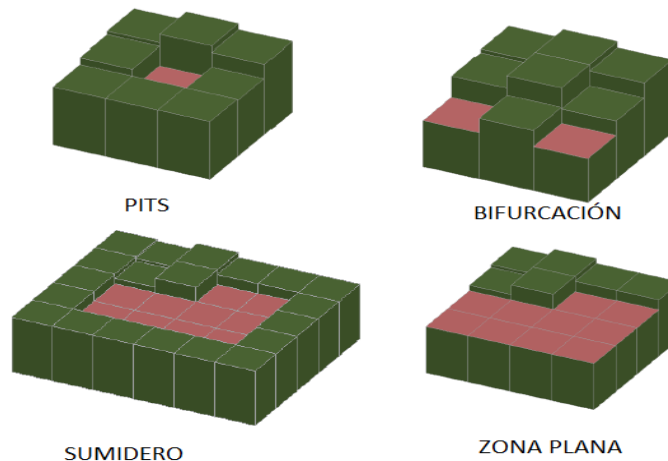


Ilustración 9 Errores comunes en los MDE, modificado de (Hernández, 2016)

Una vez se obtiene el MDE, se genera el mapa de direcciones de flujo. Este mapa utiliza el MDE corregido. El proceso consiste en evaluar cada celda con sus 8 celdas vecinas, y definir en qué dirección correría el flujo por cada una de ellas. El método analiza las pendientes y asigna las direcciones de drenaje. Una vez procesado el MDE, entrega un raster con la información mencionada.

3.2.4 Balance hídrico a largo plazo

El próximo paso a desarrollar es el balance hídrico de largo plazo, que de forma teórica se puede expresar como:

$$\frac{ds(t)}{dt} = P(t) - E(t) - R(t)$$

Donde $S(t)$ representa el almacenamiento en el suelo y en los acuíferos, $P(t)$ representa la precipitación integrada en la cuenca, $E(t)$ representa la evapotranspiración real en la cuenca y $R(t)$ representa la escorrentía total en la salida de la cuenca (Hernández, 2016). En el largo plazo el cambio en el almacenamiento en el suelo y en los acuíferos tiende a cero, pues es mínimo en comparación con los otros términos de la ecuación, además los valores de precipitación $P(t)$, $E(t)$ y $R(t)$, se pueden cambiar por los datos de largo plazo, por lo que la ecuación quedaría reformulada de la siguiente manera

$$R(t) = P(t) - E(t)$$

Lo que quiere decir que el caudal en un punto de la corriente, es la diferencia entre la precipitación real y la evapotranspiración real.

Una vez tenidos los raster que proporcionan dicha información, y que se presentan en la Ilustración 6 y en la Ilustración 7. Se procede a generar el mapa de acumulación de caudales. El cual se construye a partir del mapa de direcciones de flujo. El mapa de acumulación permite acumular variables en el sentido del flujo, permitiendo saber el valor acumulado de una variable en una celda específica (Hernández, 2016). Debido a que el MDE es tan grande y se manejan valores de caudal muy pequeños, el mapa de acumulación de caudales se aprecia como un rectángulo color muy uniforme, con visos de colores: Es por esto que para que se puedan apreciar bien los resultados del mapa de acumulación, se opta por mostrar la cuenca de estudio sobre el mapa mencionado. Dicha cuenca se traza con otro de los complementos desarrollados por Hernández, el cual utiliza el mapa de direcciones y una coordenada ingresada por el usuario para trazar la cuenca. El resultado de lo explicado anteriormente se puede ver en la Ilustración 10: La línea azul continua que resalta sobre la imagen, es la corriente principal del Río Otún, la cual fue generada de la misma forma que la cuenca y que requiere los mismos datos. En el lado superior izquierdo, donde convergen la línea azul punteada y la línea azul continua, es el punto donde está la estación del IDEAM y es el punto más aguas abajo de la misma cuenca.

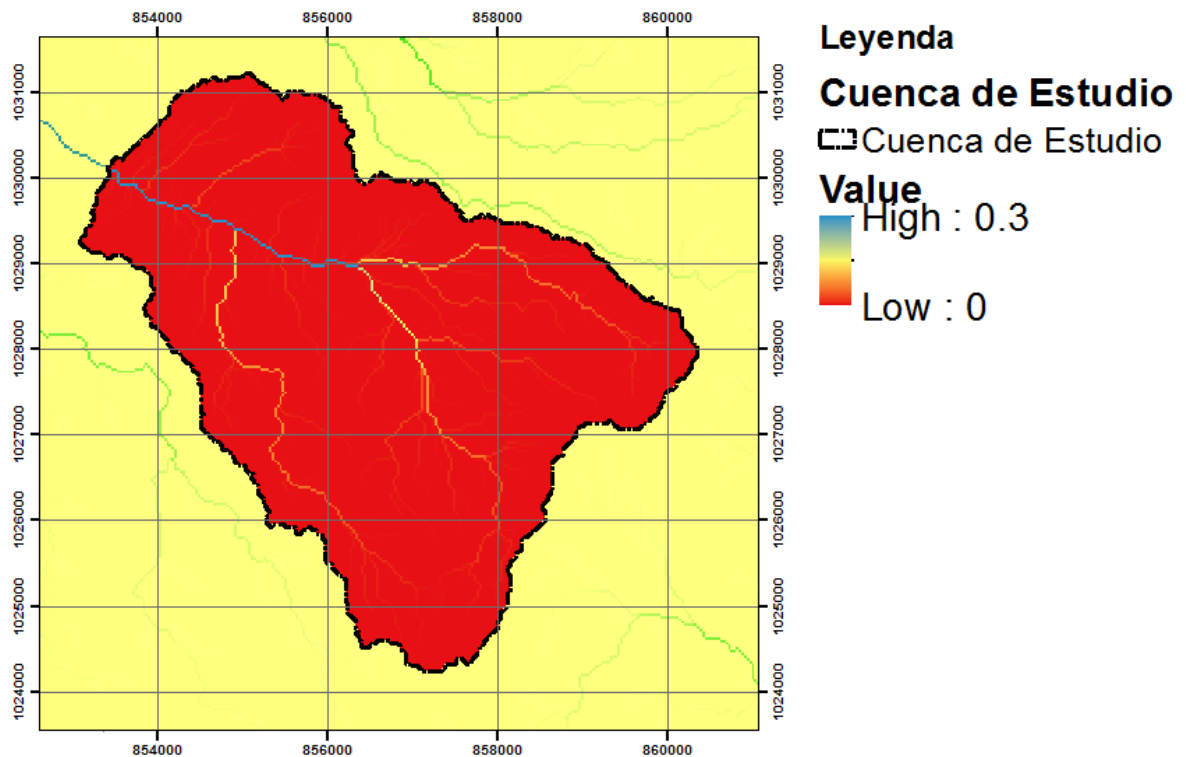


Ilustración 10 Cuenca de estudio sobre el mapa de acumulación de caudales, Recuperado de QGIS

Posteriormente se procede a realizar el mapa de disponibilidad hídrica. Debido a que el mapa de acumulación de caudales está elaborado por medio del balance hídrico a largo plazo, no contempla posibles descargas o captaciones externas en las corrientes de una cuenca. Por lo tanto, lo que permite el mapa de disponibilidad hídrica, es ingresar esta información de forma manual. Para esto se deben Conocer las coordenadas y el caudal captado o descargado en la corriente. Para este caso no se cuenta con información de captaciones o descargas externas. Se considera que por estar estudiando la alta montaña y con condiciones climáticas tan complejas no hay poblaciones que afecten los datos originales. Es por esto que el mapa de disponibilidad hídrica es completamente igual al mapa de acumulación de caudales.

El programa permite seleccionar un punto, el cual entrega el caudal acumulado. Para el punto de cierre de la cuenca con el río Claro se obtuvo un caudal acumulado de $0.59 \text{ m}^3/\text{s}$

3.2.5 Tamaño del proyecto

Luego de tener procesados los datos anteriores, que fueron la base para poder entrar a calcular la localización del proyecto, se procedió a trazar la cuenca que se muestra en la Ilustración 10. Conociendo la potencia necesaria que son 10 kW, se trazó una gráfica que muestra diferentes cabezas de presión contra el caudal necesario para obtener la potencia de 10 kW, la información mencionada anteriormente se puede apreciar en el Gráfico 1 y en la Tabla 7.

Analizando los datos de la Tabla 7 se optó por analizar el caudal y diferencia de altura, de $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ y 20 m respectivamente. Esto con el objetivo de que las obras civiles sean menores y por consiguiente los costos disminuyan.

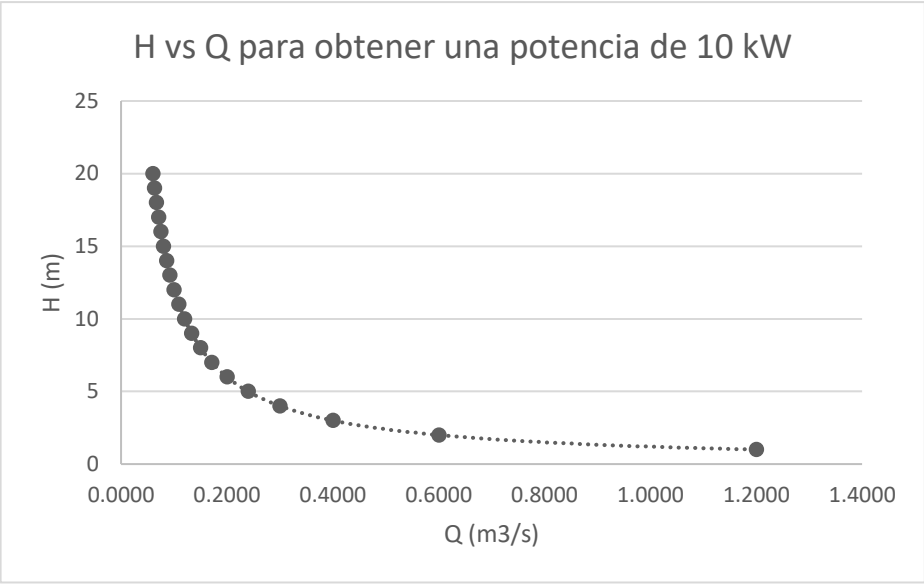


Gráfico 1 Diferencia de nivel y caudal necesarios para la obtención de 10 kW de potencia

Tabla 7 Diferencia de nivel y caudal para la obtención de 10 kW de potencia

| Q (m3/s) | H(m) |
|----------|------|
| 1.2005 | 1 |
| 0.6002 | 2 |
| 0.4002 | 3 |
| 0.3001 | 4 |
| 0.2401 | 5 |
| 0.2001 | 6 |
| 0.1715 | 7 |
| 0.1501 | 8 |
| 0.1334 | 9 |
| 0.1200 | 10 |
| 0.1091 | 11 |
| 0.1000 | 12 |
| 0.0923 | 13 |
| 0.0857 | 14 |
| 0.0800 | 15 |
| 0.0750 | 16 |
| 0.0706 | 17 |
| 0.0667 | 18 |
| 0.0632 | 19 |
| 0.0600 | 20 |

Para corroborar que se contara con la altura y caudal necesarios en el sitio se utilizó uno de los complementos desarrollados por Hernández llamado el perfilador energético, este complemento permite crear un perfil energético de un determinado tramo del río, la herramienta construye tres perfiles. El primero es el perfil de elevaciones en el río. El segundo el perfil de caudales en el tramo. El tercero será un perfil de potencia (Arango Hernández, 2016).

Se realizó el análisis para el tramo de río correspondiente al lugar donde estaría ubicado el centro de investigación, ya que se busca que se encuentren lo más cerca posible por condiciones de practicidad y para que una vez generada la energía sea fácil de llevar al centro de investigación. Una vez ejecutado el programa se obtiene la información presentada en la Ilustración 11

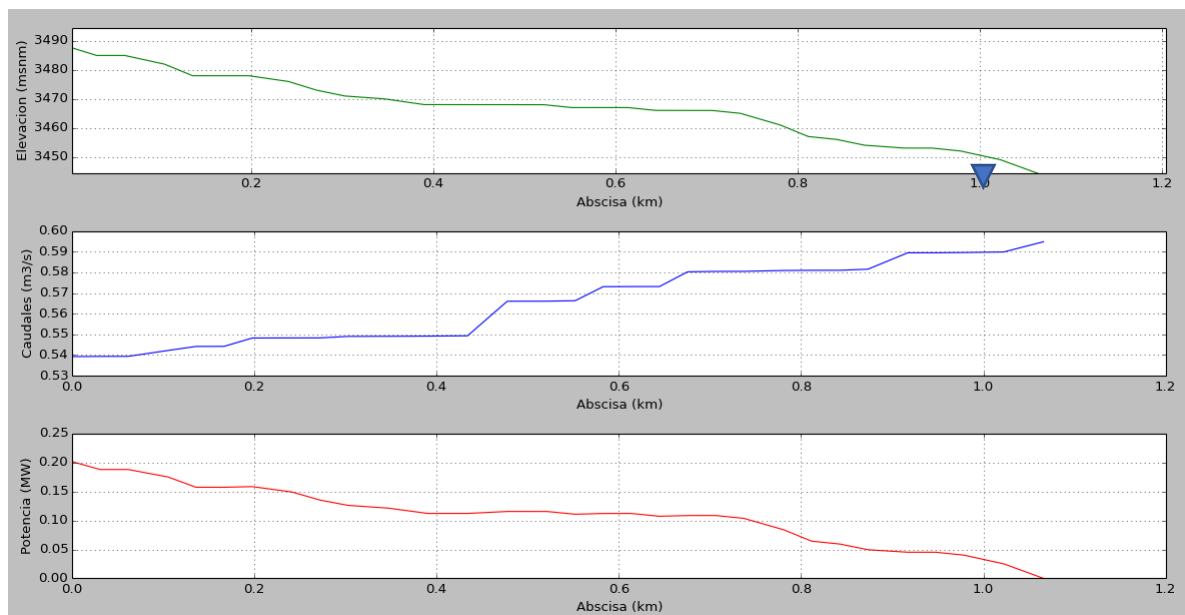


Ilustración 11 Perfil energético en el tramo de estudio, extraído de QGIS

De la Ilustración 11 es necesario mencionar que la descarga estaría ubicada a 3449 msnm, por lo tanto, al analizar la altura planteada se tiene que, para una cabeza de 20 m se cuenta con un caudal medio de $0.575 \text{ m}^3/\text{s}$ y una potencia de aproximadamente 110 kW. Estas condiciones se calculan con el caudal medio del río, sin embargo, demuestra que se tiene el potencial para generar lo que requiere el proyecto

3.2.6 Información Morfométrica de las cuencas.

La información morfométrica de cada cuenca se obtuvo mediante la herramienta QGIS. Después de haber ingresado las coordenadas de cada punto, se procedió a realizar el trazado de la cuenca, el cual se puede apreciar en la Ilustración 12. Una vez obtenida la divisoria de aguas se obtuvieron las características de la cuenca por medio de uno de los complementos desarrollados por Hernández. En la Ilustración 12, el cuadro de la izquierda corresponde a los resultados obtenidos para la cuenca del río Otún y en la derecha se encuentran los resultados obtenidos para la cuenca del río Chinchiná.

El área de la cuenca de estudio, que es la que se aprecie con una línea discontinua negra en la Ilustración 10, se calculó de la misma manera y los resultados se encuentran en la Ilustración 13.

| Resultados : | | Resultados : | |
|-----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| Área (km ²) | 277.5 | Área (km ²) | 1049.0 |
| Perímetro (km) | 116.8 | Perímetro (km) | 248.1 |
| Elevación Media (msnm) | 3228.7 | Elevación Media (msnm) | 2493.6 |
| Elevación Mínima (msnm) | 1577.0 | Elevación Mínima (msnm) | 826.0 |
| Elevación Máxima (msnm) | 4935.0 | Elevación Máxima (msnm) | 5289.0 |
| Longitud del Cauce Principal (km) | 42.7 | Longitud del Cauce Principal (km) | 74.5 |
| Pendiente del Cauce Principal (%) | 7.09 | Pendiente del Cauce Principal (%) | 5.31 |

Ilustración 12 Propiedades de las cuencas de los ríos Otún y Chinchiná

| Resultados : | |
|-----------------------------------|--------|
| Área (km ²) | 25.5 |
| Perímetro (km) | 31.3 |
| Elevación Media (msnm) | 4143.1 |
| Elevación Mínima (msnm) | 3449.0 |
| Elevación Máxima (msnm) | 4946.0 |
| Longitud del Cauce Principal (km) | 9.1 |
| Pendiente del Cauce Principal (%) | 14.17 |

Ilustración 13 Propiedades de la cuenca de estudio

3.2.7 Análisis de las series de caudales del IDEAM

Se tiene la información de dos series de caudales, la del río Chinchiná y la del río Otún, sin embargo, se debe seleccionar una sola de ellas para obtener, por medio de procesos estadísticos, la serie de caudales para la cuenca de estudio.

Para la serie del río Otún, se contó con datos de caudales diarios desde el 01/01/1971. Hasta el 31/12/2013. Aunque se evidenciaron días que no contaban con datos, la información estaba bastante completa. Para el río Chinchiná se contaba con datos promedio mensuales desde enero de 1971 hasta diciembre del 2014. De igual forma que los datos anteriores, se encontraron meses que no presentaban caudales, sin embargo, la serie contaba con la información necesaria.

En primera instancia se calculó el caudal promedio de cada una de las cuencas. Este proceso no es más que calcular el promedio aritmético de todos los datos suministrados. La anterior información se puede ver en la Tabla 8.

Tabla 8 Caudales medios de las cuencas del río Otún y Chinchiná

| Estación | código | Q medio m^3/s |
|---------------|----------|--------------------|
| Río Otún | 26137110 | 12.76 |
| Río Chinchiná | 26157020 | 27.72 |

3.2.8 Regionalización

Una vez conocidos los caudales medios de cada serie y su respectiva área se procede a hacer la regionalización. El proceso consiste en relacionar una cuenca, la cual es conocida su área y su caudal medio. Con otra cuenca a la que se le conoce únicamente su área. Este proceso puede realizarse debido a que las cuencas se encuentran en la misma región geográfica y sus características son similares. El resultado obtenido de la regionalización es el caudal medio de la cuenca de estudio.

Para el cálculo del caudal promedio de la cuenca de estudio se aplica una regionalización simple la cual solo involucra el caudal medio anual y el área, la ecuación sería la siguiente:

$$q = \frac{Qa}{A}$$

Donde q es el caudal medio que se desea conocer, Q es el caudal medio conocido, a, es el área de la cuenca a la que se le va a calcular el caudal y A, es el área de la cuenca con un caudal Q. Los resultados de la regionalización se muestran en la Tabla 9

Tabla 9 Caudales medios obtenidos por regionalización.

| Estación | código | Q medio m^3/s | Área Km^2 | Área cuenca estudio Km^2 | Q medio cuenca estudio m^3/s |
|---------------|----------|--------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Río Otún | 26137110 | 12.76 | 277.5 | 25.5 | 1.172 |
| Río Chinchiná | 26157020 | 27.72 | 1049.0 | 25.5 | 0.673 |

Al analizar los datos de caudal medio arrojados por la regionalización y compararlos con los datos del balance hídrico de largo plazo se puede ver que el valor de $0.673 \text{ m}^3/s$ del río Otún es mucho más cercano al valor de $0.595 \text{ m}^3/s$. El valor de $1.172 \text{ m}^3/s$ que ofrecen los datos del río Chinchiná se desvían considerablemente de los otros dos valores.

3.2.9 Medición de caudal en campo

En una visita de campo que se realizó en el año 2014 a la zona de estudio, se realizó un aforo con correntómetro. A continuación, se muestra en el Gráfico 2 la que sería la sección transversal de dicho aforo. Para el aforo se tomaron datos aproximadamente cada 50 cm, y dependiendo de la profundidad se tomaron entre 3 y 4 datos de velocidad del flujo. Los datos tomados en campo se pueden ver en la

Tabla 10.

Con el objetivo de encontrar el caudal, basándose en las velocidades medidas por el correntómetro, se siguieron los pasos establecidos en (López Cualla, 2003), de allí se adoptaron dos metodologías para el cálculo. La primera, llamada el método de los cinco puntos requirió una adaptación, pues se contaba con un máximo de 4 puntos de toma de velocidad. La descripción de los métodos es la siguiente:

Método de los cinco puntos: “Consiste en medir la velocidad del flujo en la superficie, en un punto cercano al fondo y en 3 puntos intermedios, situados a 0.2, 0.6 y 0.8 veces la profundidad h de la vertical de aforo” (Marbello, 1997, pág. 224)

Tabla 10 Datos del aforo en campo

| L(m) | 3.95 | 3.5 | 3 | 2.5 | 2 | 1.5 | 1 | 0.5 | 0.1 |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| h(cm) | 44 | 57 | 76 | 78 | 57 | 53 | 46 | 28 | 7 |
| H (cm) | | 23 | 15 | 15.5 | 23 | 21 | 18 | 11 | |
| V (m/s) | | 0.163 | 0.291 | 0.607 | 0.299 | 0.517 | 0.487 | 0.19 | |
| H (cm) | | 34 | 30.5 | 31 | 34 | 32 | 28 | 17 | |
| V (m/s) | | 0.157 | 0.232 | 0.736 | 1.676 | 0.808 | 0.661 | 0.221 | |
| H (cm) | | 45.5 | 45.5 | 47 | 46 | 42 | 37 | 23 | |
| V (m/s) | | 0.175 | 0.335 | 0.692 | 1.64 | 0.84 | 0.701 | 0.375 | |
| H (cm) | | | 61 | 62.5 | | | | | |
| V (m/s) | | | 0.435 | 0.627 | | | | | |

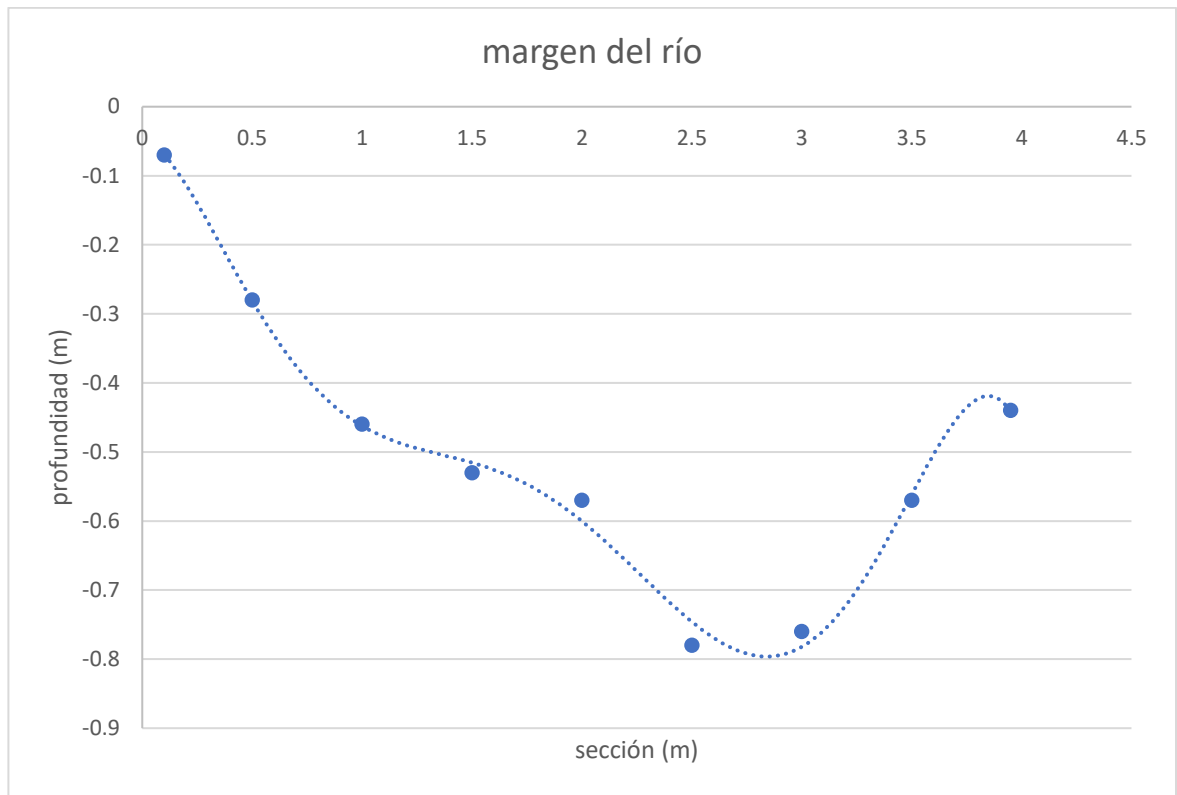


Gráfico 2 sección real del río Claro

La ecuación del autor se plantea de la siguiente manera:

$$Vm = \frac{Vs + 3V_{0.2} + 2V_{0.6} + 3V_{0.8} + Vf}{10}$$

Donde V_s es la velocidad superficial, $V_{0.2}$ es la velocidad a 0.2 h, $V_{0.6}$ es la velocidad a 0.6 h, $V_{0.8}$ es la velocidad a 0.8 h, y V_f es la velocidad del fondo.

La ecuación modificada y con la que se plantea calcular la velocidad media de la sección del río para cuatro datos es la siguiente:

$$Vm = \frac{2V_{0.2} + 3V_{0.4} + 3V_{0.6} + 2V_{0.8}}{10}$$

Método 0.2-0.6-0.8:

Este método se calcula como el promedio aritmético entre los 3 valores de velocidad, y queda de la siguiente manera:

$$Vm = \frac{V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8}}{3}$$

Una vez obtenidas las velocidades medias en cada punto se procede a calcular el caudal medio en dicha sección, el cual está dado por:

$$q_i = Vm_i * A_i$$

Donde A_i el área de la sección. Como se puede apreciar en la Ilustración 14, es la multiplicación de $b_i * h_i$.

“Calcular el caudal total de la corriente, como la sumatoria de los caudales parciales q_i obtenidos en el paso anterior, así” (Marbello, 1997).

$$Q = \sum_{i=1}^k q_i$$

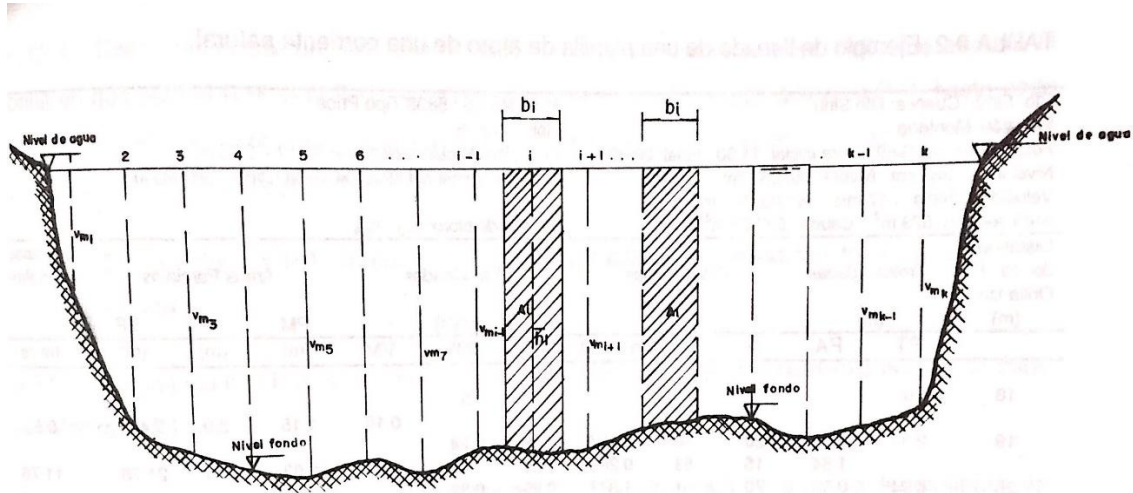


Ilustración 14 definición de áreas parciales en la sección de aforo, recuperado de (Marbello, 1997, pág. 233)

Los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 11.

Tabla 11 cálculos para el aforo en campo

| L (m) | 3.95 | 3.5 | 3 | 2.5 | 2 | 1.5 | 1 | 0.5 | 0.1 |
|---------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| h (m) | 0.44 | 0.57 | 0.76 | 0.78 | 0.57 | 0.53 | 0.46 | 0.28 | 0.07 |
| V media m/s | | 0.17 | 0.32 | 0.68 | 1.21 | 0.72 | 0.62 | 0.26 | |
| A media m ² | 0.12 | 0.27 | 0.38 | 0.39 | 0.29 | 0.27 | 0.23 | 0.13 | 0.02 |
| qi m ³ /s | | 0.045 | 0.120 | 0.263 | 0.343 | 0.191 | 0.142 | 0.033 | |
| Q total m ³ /s | 1.14 | | | | | | | | |

Las coordenadas del aforo son las que se muestran en la Tabla 12. Estas coordenadas, se encuentran muy cerca de las coordenadas del centro de investigación como se muestra en la Tabla 13. Aunque el caudal encontrado en campo es significativamente superior al caudal

encontrado por medio de la serie de caudales, y los cálculos hidrológicos, se considera un dato aislado que simplemente da una idea del orden de magnitudes de los caudales que se manejan en la zona. Se necesitarían muchos más datos para que las mediciones en campo tuvieran un mayor peso.

Tabla 12 Coordenadas aforo de campo

| | | |
|-------------|---|-------------|
| coordenadas | N | 4°52'10.9" |
| | W | 75°24'0.99" |

Tabla 13 Coordenadas del centro de investigación

| | | |
|-------------|---|------------|
| coordenadas | N | 4°52'11.9" |
| | W | 75°24'6.2" |

3.2.10 Normalización de la serie de caudales

Debido a que el caudal de la serie del río Chinchiná se desvía considerablemente de los otros datos de caudal obtenidos, se toma la decisión de procesar la serie de caudales del río Chinchiná que es más completa, pero con el caudal medio del río Otún. Es decir, la serie de caudales del río Chinchiná se normalizará con respecto a un caudal medio de $0.673 \text{ m}^3/\text{s}$.

El proceso para normalizar la serie de caudales es relativamente sencillo. Se toma cada dato y se le resta el caudal medio de la serie, que en este caso es $12.76 \text{ m}^3/\text{s}$, al resultado se le divide nuevamente por el caudal medio, este proceso se repite para cada uno de los datos como se muestra a continuación

$$Q_{\text{normalizado}} = \frac{(Q_i - Q_{\text{medio}})}{Q_{\text{medio}}} = \frac{(Q_i - 12.76)}{12.76}$$

Con esto se obtiene una serie de caudales normalizada centrada en cero. Para obtener la serie de caudales que se necesita para la cuenca de estudio, se aplica el proceso inverso pero esta vez con el caudal medio de la cuenca de estudio, que para este caso particular es de $0.673 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$q_{\text{estudio}} = (Q_{\text{normalizado}(i)} * q_{\text{medio}}) + q_{\text{medio}} = (Q_{\text{normalizado}(i)} * 0.673) + 0.673$$

De tal forma que el proceso consiste en multiplicar cada dato de la serie normalizada por dicho caudal medio y al resultado sumarle el mismo caudal medio, de esta manera se obtiene una serie de caudales centrada en el caudal medio de su respectiva cuenca.

3.2.11 Ciclo anual de caudales

Con la serie de datos se puede construir el ciclo anual de caudales. Para esto se encuentra el caudal medio de cada mes y realiza una gráfica que muestra el caudal promedio por mes, los caudales máximos y los caudales mínimos. Para el presente estudio se realizó dicho procedimiento y a continuación se muestran los resultados en el Gráfico 3

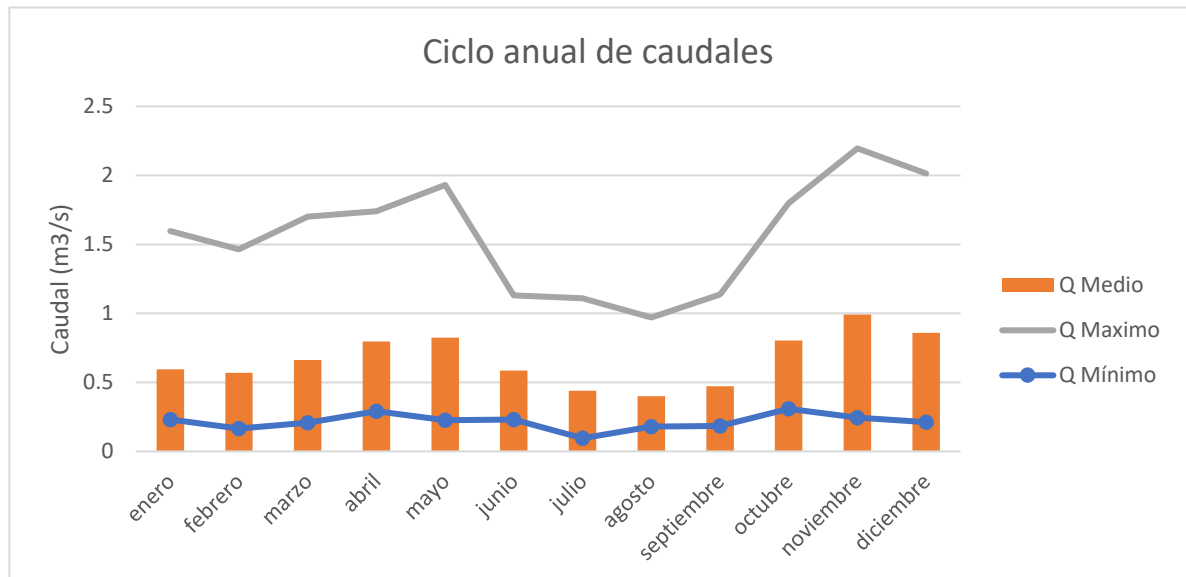


Gráfico 3 Ciclo anual de caudales

Se puede ver que el ciclo anual cumple con la distribución de lluvias anuales de la región andina, donde los períodos altos de precipitación se presentan en los trimestres marzo-abril-mayo y octubre noviembre y diciembre.

3.2.12 Curva de duración de caudales

Para la realización de la curva de duración de caudales lo primero que se hizo fue ordenar la serie en orden ascendente. Posteriormente se le adjudicó a cada valor de caudal un número de orden desde $n=1$ hasta $n=15333$, luego se calculó la probabilidad de ocurrencia d , la cual se calculó como $n/15333$, una vez calculada la probabilidad de ocurrencia, se calcula la probabilidad de excedencia que no es más que 1 -probabilidad de ocurrencia. La Ilustración 15 muestra un ejemplo de los cálculos realizados para obtener la curva de duración de caudales.

El ciclo anual de caudales sirve entre otras para calcular el caudal ecológico de la corriente, que como se explicó anteriormente equivale al 25% del mínimo caudal mensual multianual. En este estudio se encontró que el caudal mínimo mensual multianual era de $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$. Dicho dato se encontró en el mes de julio de 1985. Luego el caudal ecológico será de: $0.023 \text{ m}^3/\text{s}$.

| serie normalizada | caudales | n | probabilidad | probabilidad excedencia |
|-------------------|-------------|----|--------------|-------------------------|
| -0.970218236 | 0.02005785 | 1 | 6.5219E-05 | 0.999934781 |
| -0.955327355 | 0.030086775 | 2 | 0.00013044 | 0.999869562 |
| -0.950624971 | 0.033253803 | 3 | 0.00019566 | 0.999804344 |
| -0.950624971 | 0.033253803 | 4 | 0.00026088 | 0.999739125 |
| -0.941220203 | 0.039587861 | 5 | 0.00032609 | 0.999673906 |
| -0.931031705 | 0.046449757 | 6 | 0.00039131 | 0.999608687 |
| -0.931031705 | 0.046449757 | 7 | 0.00045653 | 0.999543468 |
| -0.931031705 | 0.046449757 | 8 | 0.00052175 | 0.99947825 |
| -0.921626938 | 0.052783815 | 9 | 0.00058697 | 0.999413031 |
| -0.921626938 | 0.052783815 | 10 | 0.00065219 | 0.999347812 |
| -0.921626938 | 0.052783815 | 11 | 0.00071741 | 0.999282593 |
| -0.921626938 | 0.052783815 | 12 | 0.00078263 | 0.999217374 |
| -0.921626938 | 0.052783815 | 13 | 0.00084784 | 0.999152155 |
| -0.921626938 | 0.052783815 | 14 | 0.00091306 | 0.999086937 |
| -0.921626938 | 0.052783815 | 15 | 0.00097828 | 0.999021718 |
| -0.913789632 | 0.058062196 | 16 | 0.0010435 | 0.998956499 |
| -0.91143844 | 0.059645711 | 17 | 0.00110872 | 0.99889128 |
| -0.91143844 | 0.059645711 | 18 | 0.00117394 | 0.998826061 |
| -0.91143844 | 0.059645711 | 19 | 0.00123916 | 0.998760843 |
| -0.909870979 | 0.060701387 | 20 | 0.00130438 | 0.998695624 |
| -0.902033672 | 0.065979769 | 21 | 0.00136959 | 0.998630405 |
| -0.902033672 | 0.065979769 | 22 | 0.00143481 | 0.998565186 |
| -0.902033672 | 0.065979769 | 23 | 0.00150003 | 0.998499967 |
| -0.902033672 | 0.065979769 | 24 | 0.00156525 | 0.998434749 |
| -0.901249942 | 0.066507607 | 25 | 0.00163047 | 0.99836953 |
| -0.901249942 | 0.066507607 | 26 | 0.00169569 | 0.998304311 |
| -0.901249942 | 0.066507607 | 27 | 0.00176091 | 0.998239092 |

Ilustración 15 Información base de la curva de duración de caudales

Una vez se tienen los datos se procede a graficarlos. Se ubica la probabilidad de excedencia en el eje de las abscisas y el caudal en el eje de las ordenadas. Los resultados se presentan en el Gráfico 4.

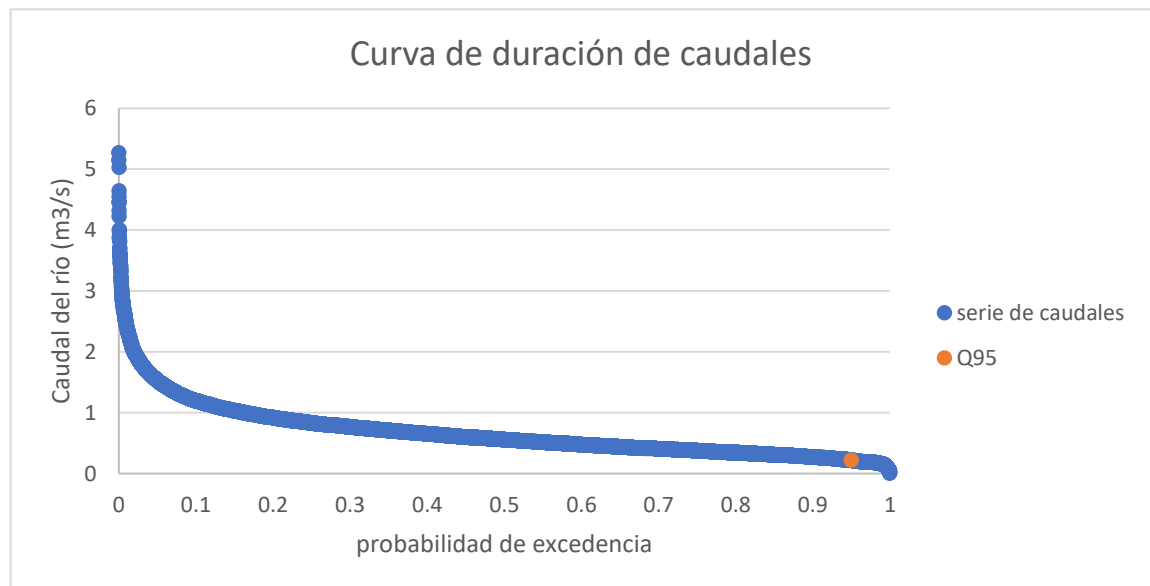


Gráfico 4 Curva de duración de caudales

El valor de Q95 equivale a $0.216 \text{ m}^3/\text{s}$, esto significa que el 95% del tiempo se tendrá un caudal equivalente a 3.6 veces el caudal de diseño, lo cual garantiza la generación de energía de forma constante.

3.2.13 Caudal producido y vertido

El siguiente paso es encontrar los valores de caudal producido y caudal vertido. Para ello es necesario conocer el tipo de turbina que se va a utilizar, puesto que cada tipo de turbina requiere un porcentaje mínimo del caudal de diseño para poder operar, por lo tanto, para poder continuar se requiere dicha información.

Lo primero que se estableció en este sentido es que se debía tratar de una turbina comercial, por lo tanto, se buscó en catálogos de comercializadores de turbinas y se encontró que se mencionaba mucho la marca Toshiba dentro de las opciones para gran parte de compradores y vendedores, en consecuencia, se toma la decisión de inclinarse por la marca Toshiba y se procede a escoger la turbina específica que se requerirá.

Con la ayuda de la Ilustración 16 se puede ver que el tipo de turbina necesaria sería una turbina Hydro eKids s3c. Este tipo de turbina requiere un mínimo de $\frac{1}{12} Q_d$ para funcionar, de manera que con $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ podrá entrar en funcionamiento. Teniendo establecido esto, se procede con el cálculo de los caudales de producción y de vertimiento. De manera tal que si:

$$Q < Q_e; Q_p = 0 \wedge Q_v = 0$$

Donde Q es el caudal del río. Q_e es el caudal ecológico y Q_v es el caudal vertido, pero si se cumple que

$$Q > Q_e: Q_p = \min\left(\frac{1}{12} * Q_d; Q - Q_e\right)$$

$$Q_v = \max(Q - (Q_d + Q_e); 0)$$

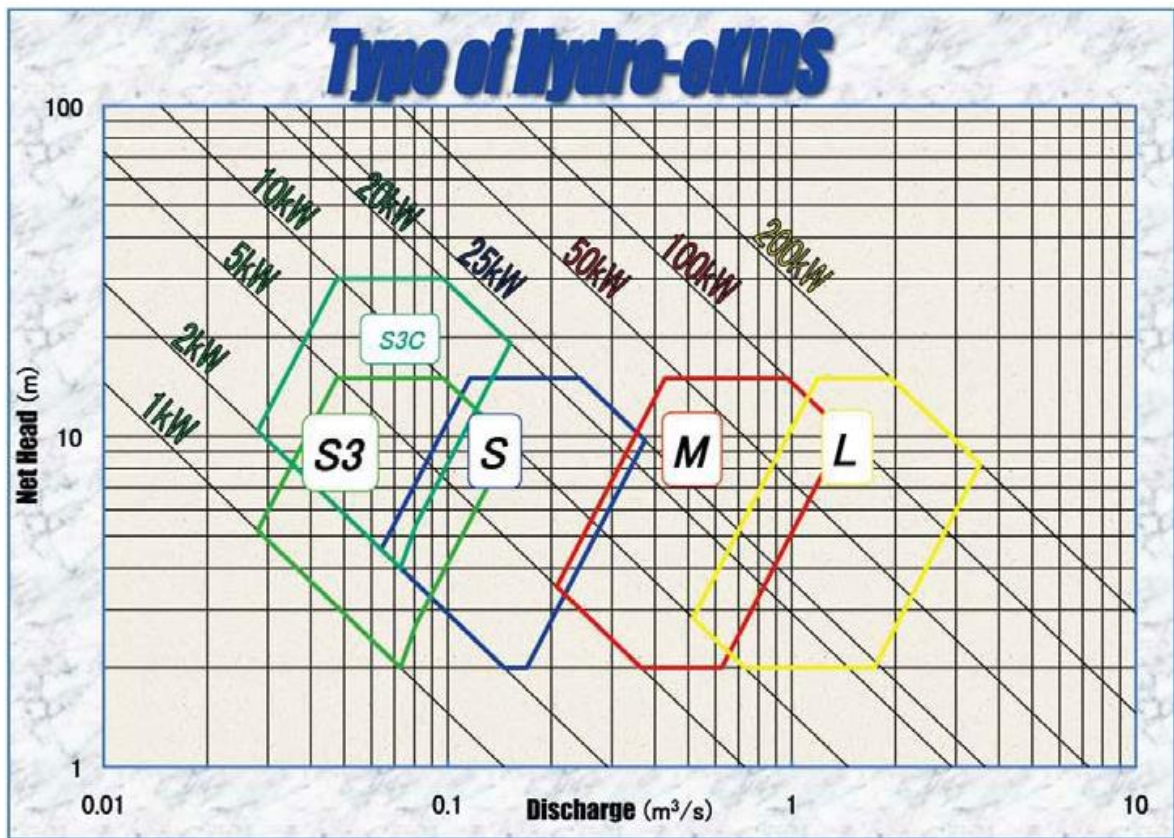


Ilustración 16 tipos de turbinas de Toshiba (Toshiba, 2016)

Una vez se establecieron los anteriores parámetros se procede a encontrar el factor de planta, el cual no es más que una relación entre la energía media generada y la energía que se podría generar en un período de tiempo, que por lo general es un año. Para el caso de estudio se encontró que el factor de planta es de 0.99 lo que significa que casi el 100% del tiempo la planta está generando a máxima capacidad.

Finalmente se establece la energía firme del proyecto que será la energía que se produce con el Q95.

$$Q_{\text{firme}} = Q_{95} - Q_e - Q_{\text{mínimo turbinable}}$$

para este caso el Q_{95} se estableció en 0.216, el Q_e en $0.023 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal mínimo turbinable en $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo tanto, la anterior operación da como resultado $0.188 \text{ m}^3/\text{s}$, que es superior al caudal de diseño de $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$. De esta manera la energía firme estaría representada por el caudal de diseño y daría como resultado 10 kWh.

3.3 POTENCIAL DE LA ZONA

Para el planteamiento del potencial de la zona se selecciona un tramo del río, el cual comprende aproximadamente 400 metros aguas arriba del centro de investigación y 400

metros aguas abajo del mismo. Una vez seleccionado el tramo se ejecutó la herramienta de identificador de filo de agua, la cual “sirve para identificar el mejor proyecto con Derivación según ciertos parámetros definidos por el usuario” (Arango Hernández, 2016). Al programa se le ingresan: coordenadas inicial y final del tramo, el mapa de direcciones, el modelo digital de elevación y el mapa de disponibilidad hídrica. Luego se le pide al usuario que defina si la conducción se realizará de forma superficial o si se realizará por medio de túneles; en esta parte se decidió tomar una conducción superficial, debido a que una conducción subterránea acarrearía más costos y su logística es más compleja. Finalmente, el programa pide que se priorice una de dos características. La primera, es la potencia, que para este caso se estableció la potencia del proyecto, esto quiere decir, 10 kW; la segunda es la conducción máxima, este parámetro se dejó como lo trae el programa por defecto que son 10 km, la razón por la cual no se modificó es porque se prioriza la opción de la potencia.

“Como resultado la herramienta creará un shape de puntos con la captación del proyecto identificado, y mostrará un perfil con la localización de los mismos y sus características principales” (Arango Hernández, 2016)

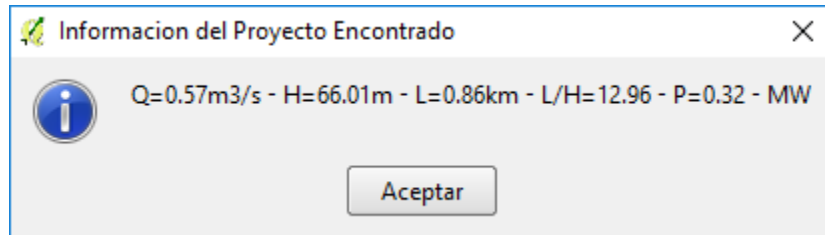


Ilustración 17 Información del proyecto óptimo en zona de estudio

Se puede ver que en dicho tramo del río se podría generar hasta 320 kW, según la información presentada en la Ilustración 17. Para ello se necesitaría contar con un delta de alturas de 66.01 m, una conducción de aproximadamente 860 m; el dato que se muestra de $0.57 \text{ m}^3/\text{s}$, es el caudal medio del río en el punto de la captación, dicho caudal, es calculado con el balance hídrico de largo plazo que realizó el programa pasos atrás.

El Gráfico 5 muestra el perfil del río, y en él se muestra la ubicación de la captación, que corresponde al ícono en la parte superior del gráfico, también se muestra la ubicación de la descarga con un ícono en la parte inferior.

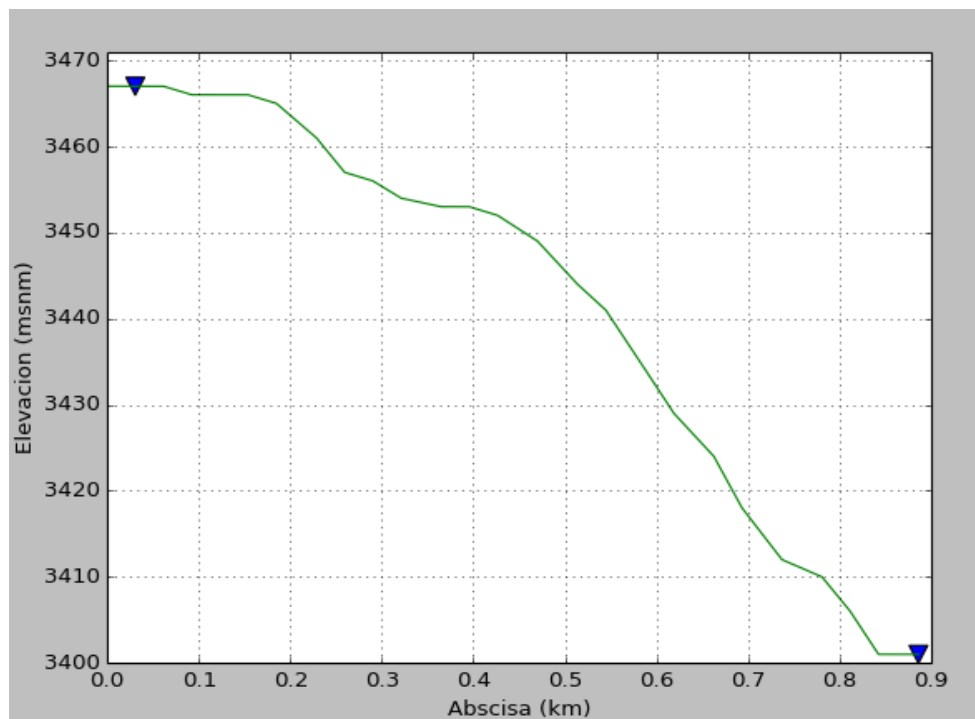


Gráfico 5 Perfil del río claro en zona de estudio

La Ilustración 18 muestra la cuenca de estudio sobre el mapa de acumulaciones de caudales, de modo que se puedan apreciar la ubicación de la captación y de la descarga sobre el río Claro. El punto que se encuentra más arriba en la imagen corresponde al punto de la descarga, mientras que el punto que se encuentra debajo de él, corresponde a la captación.

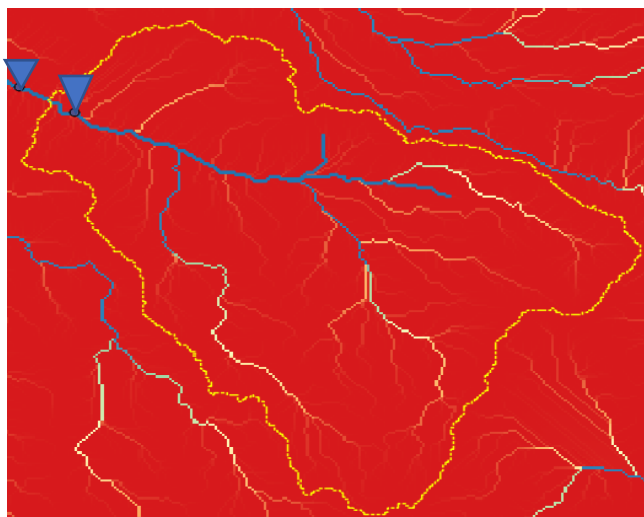


Ilustración 18 Ubicación de la captación y la descarga del proyecto óptimo de la zona

El proyecto óptimo de la zona es significativamente superior al proyecto a desarrollar, esto porque el proyecto a desarrollar cuenta con un caudal aproximadamente 10 veces menor y el delta de alturas es de aproximadamente el triple. Se puede llegar a pensar que se está desaprovechando una gran cantidad de potencia, sin embargo, el centro de investigación no tiene proyectos de expansión en el corto o mediano plazo, por lo cual no se analiza la necesidad de sobredimensionar el proyecto. Esto solo incrementaría los costos y haría inviable el proyecto, por otra parte, está la opción de vender a la red o a los vecinos, sin embargo, en el primero de los casos, la zona se encuentra a gran altura y alejada de poblaciones, por lo cual llevar la energía hasta estas redes, sería costoso y el beneficio económico podría ser mínimo o podría llegar a ser negativo. Para la segunda opción los posibles vecinos que se encuentren en la zona no se encuentran agrupados, por lo que se tendría que analizar y construir una distribución diferente para cada uno. Adicionalmente esta zona no tiene tendencias a incrementar su población, primero por la altura en la que se encuentra y segundo, por estar tan cerca de una reserva natural.

3.4 DISEÑO CONCEPTUAL DE OBRAS CIVILES Y COSTOS

Para el diseño de las obras civiles, se siguió la metodología planteada por López Cualla en su libro, elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. Se consideraron 3 obras civiles necesarias, estas son: sistema de captación, tanque desarenador y finalmente la conducción entre los dos anteriores.

3.4.1 Diseño de la captación

Para el diseño de la captación existen diferentes alternativas, entre ellas: toma lateral con muro transversal, bocatoma de fondo, bocatoma de fondo con bombeo, toma mediante la estabilización del lecho y estaciones de bombeo flotantes. Existen dos factores determinantes para la selección de la bocatoma óptima, los cuales son: la naturaleza del cauce y la topografía general del proyecto (López Cualla, 2003).

Tanto la bocatoma de fondo como la toma lateral, se emplean en ríos pequeños o quebradas cuyo cauce no es muy profundo, la bocatoma lateral con bombeo se utiliza para grandes caudales y con sección ancha, la bocatoma lateral por gravedad se utiliza principalmente en río profundos, la toma mediante estabilización del lecho se realiza para ríos con sección muy grande y un lecho poco estable, finalmente las estaciones de bombeo flotantes se utilizan cuando la fluctuación del nivel del río es alta. (López Cualla, 2003)

Por la medición hecha en campo, se puede ver que la sección del río es de escasamente 4m de longitud y el caudal medio es bajo en comparación con los caudales de las estaciones del IDEAM; por lo tanto, se toma la decisión de seleccionar la bocatoma de fondo como alternativa viable para el proyecto. En este sistema “El agua se capta a través de una rejilla colocada en la parte superior de una presa, que a su vez se dirige en sentido normal a la corriente” (López Cualla, 2003). Es importante mencionar que, aunque se hable de una presa, no cambia el hecho de que la central se considere a filo de agua, dado que la presa

de la captación es muy pequeña, no genera llanuras de inundación y se podría considerar más como un resalto hidráulico cuya función es la de captar el caudal de diseño.

Los principales elementos de la central son los siguientes:

Presa: En ella se encuentra la rejilla por donde se capta el agua, su función es mantener un nivel mínimo de la lámina de agua.

Solados superior e inferior: se ubican tanto aguas arriba como aguas debajo de la presa, son los encargados de proteger la presa de la erosión.

Muros laterales: su función es conducir la corriente de agua hacia la captación, también ayudan a proteger los taludes de la erosión.

Rejilla: se encuentra sobre el canal de aducción, su longitud varía dependiendo del caudal que se desee captar.

Canal de aducción: es el encargado de llevar el agua captada por la rejilla hacia la cámara de recolección.

Cámara de recolección: cámara en concreto encargada de almacenar el agua que se llevará al desarenador y de disponer del caudal de excesos para devolverlo al cauce del río.

Los anteriores elementos de la captación se pueden ver en la Ilustración 19.

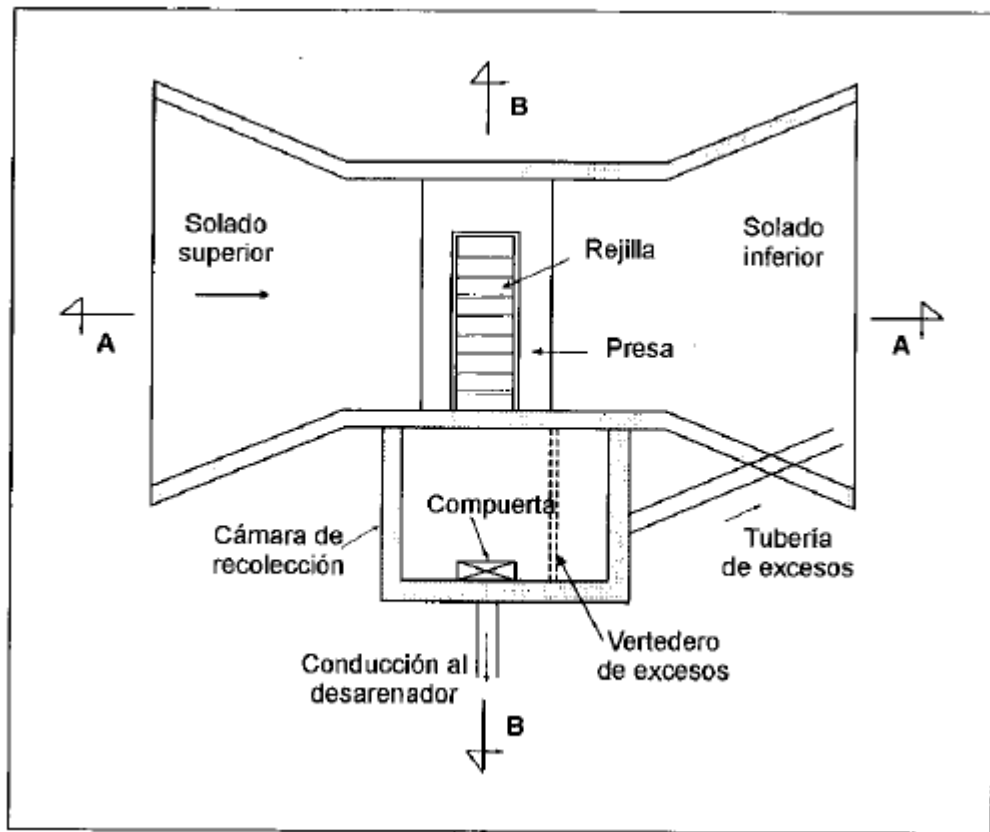


Ilustración 19 Elementos de la captación recuperado de (López Cualla, 2003, pág. 94)

3.4.1.1 DISEÑO DE LA PRESA

La presa y la garganta se diseñan como un vertedero vertical con contracciones laterales, la ecuación es la siguiente:

$$Q = 1.84LH^{1.5}$$

Para determinar la altura de la lámina de agua en las condiciones de diseño, se despeja el valor de H y se emplea el caudal de diseño. La longitud L se asume de 2 m. De lo anterior se tiene que el valor de H es:

$$H = 0.065 \text{ (m)}$$

Posteriormente se realiza la corrección de la longitud de vertimiento la cual corresponde a la siguiente ecuación, en la cual L' representa la longitud corregida y n corresponde al número de contracciones, que en este caso por ser rectangular corresponde a 2

$$L' = L - 0.1nH$$

De lo anterior se tiene que

$$L' = 1.987 \text{ (m)}$$

La velocidad del agua al pasar por la rejilla está dada por:

$$V_r = \frac{Q}{L'H}$$

De donde

$$V_r = 0.468 \frac{m}{s}$$

Para que se puedan cumplir las ecuaciones de chorro que se desarrollarán más adelante, la velocidad debe de estar entre 0.3 y 3.0 m/s. Se ve que se está cumpliendo dicho requerimiento.

3.4.1.2 DISEÑO DE LA REJILLA Y DEL CANAL DE ADUCCIÓN

Para el ancho del canal de aducción se requiere de las siguientes ecuaciones:

$$X_s = 0.36V_r^{\frac{2}{3}} + 0.6H^{\frac{4}{7}}$$

$$X_i = 0.18V_r^{4/7} + 0.74H^{3/4}$$

$$B = X_s + 0.1$$

De donde se tiene que

$$X_s = 0.34 ; X_i = 0.21 ; B = 0.44$$

Los cálculos se representan mediante la Ilustración 20.

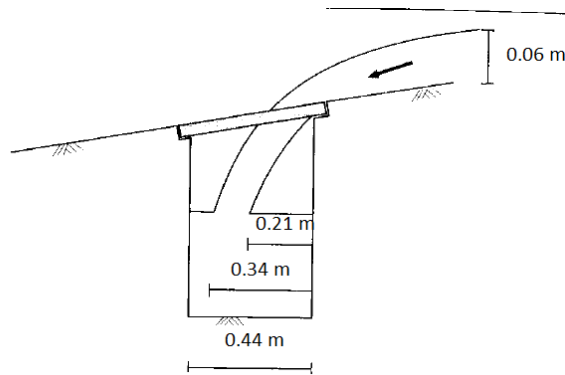


Ilustración 20 Captación a través de la rejilla a canal de aducción, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 99)

Para la rejilla:

Si se tienen barrotes en la dirección del flujo el área neta de la rejilla está dada por:

$$A_{neta} = aBN$$

Donde A_{neta} es el área neta de la varilla en m^2 , a es la separación entre barrotes en m y N es el número de orificios entre barrotes. Siendo b el diámetro de cada barrote. La superficie total de la rejilla está dada por

$$A_{total} \approx (a + b)BN$$

Haciendo una relación entre el área total y el área neta se tiene que

$$A_{neta} = \frac{a}{a + b} A_{total}$$

Remplazando el área total en términos de la longitud de la rejilla L_r , se tiene que el área neta está dada por

$$A_{neta} = \frac{a}{a + b} BL_r$$

Por otra parte, el caudal a través de la rejilla es

$$Q = KA_{neta}V_b$$

Donde $K = 0.9$ para flujo paralelo a la sección, V_b es la velocidad entre barrotes, que se considera máximo de 0.2 m/s para evitar el arrastre de partículas. Se adoptan barrotes de $\frac{3}{4}"$ (0.0191 m) y una separación entre ellos de 0.10 m.

De esto se tiene que

$$A_{neta} = \frac{0.06}{0.9 * 0.2} = \frac{0.10}{0.10 + 0.0191} 0.44L_r$$

Los resultados de los cálculos de la rejilla se pueden ver en la Tabla 14

Tabla 14 Resultados del cálculo de los elementos de la rejilla

| Rejilla | |
|-----------------------|-------|
| A neta (m^2) | 0.333 |
| A (m) | 0.100 |
| B (m) | 0.450 |
| N | 7.407 |
| b (m) | 0.019 |
| A total (m^2) | 0.397 |
| Q rejilla (m^3/s) | 0.060 |
| Lr (m) | 0.882 |
| Vb (m/s) | 0.200 |

De esta manera la rejilla quedaría como se muestra en Ilustración 21.

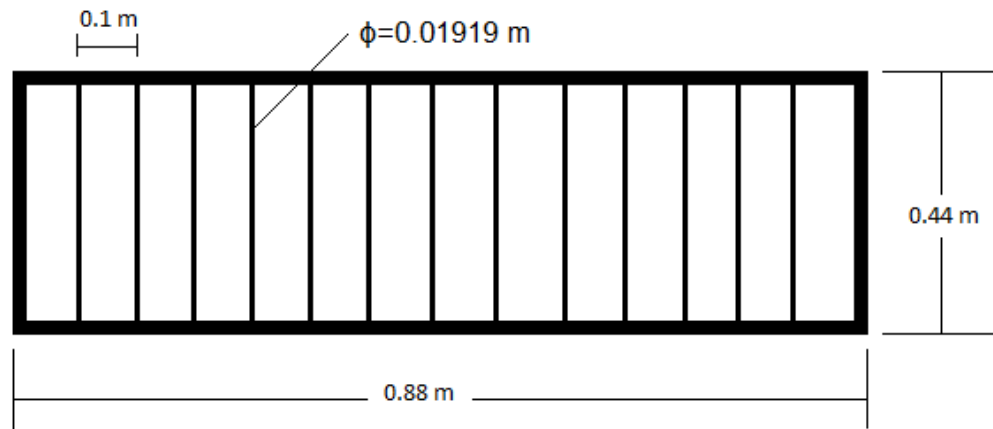


Ilustración 21 Rejilla de recolección.

3.4.1.3 NIVELES EN EL CANAL DE ADUCCIÓN

Para la estimación de los niveles se tienen las siguientes ecuaciones

$$h_o = \left[2he^2 + \left(he - \frac{iLc}{3} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{2}{3}iLc$$

Para que la entrega a la cámara de recolección se de en descarga libre se debe dar que

$$h_e = h_c$$

$$h_c = \left(\frac{Q^2}{gB^2} \right)^{1/3}$$

Donde h_o es la profundidad aguas arriba en m, h_e es la profundidad aguas abajo en m, h_c es la altura crítica, i es la pendiente del fondo, g es la aceleración de la gravedad, L_c es la longitud del canal, dada por la longitud de la rejilla más el espesor del muro. Adicional a esto se debe dejar un borde libre de 15 centímetros.

Los resultados de los anteriores cálculos se muestran en la Tabla 15. Y se pueden apreciar en la Ilustración 22.

Tabla 15 Cálculos canal de aducción

| Canal de aducción | |
|-------------------------|-------|
| h_o (m) | 0.181 |
| h_e (m) | 0.122 |
| H_e (m) | 0.122 |
| l (m) | 0.030 |
| g (m/s ²) | 9.810 |
| L_c (m) | 1.182 |
| Espesor muro (m) | 0.300 |
| H_o (m) | 0.330 |
| H_e (m) | 0.360 |
| BL (m) | 0.150 |

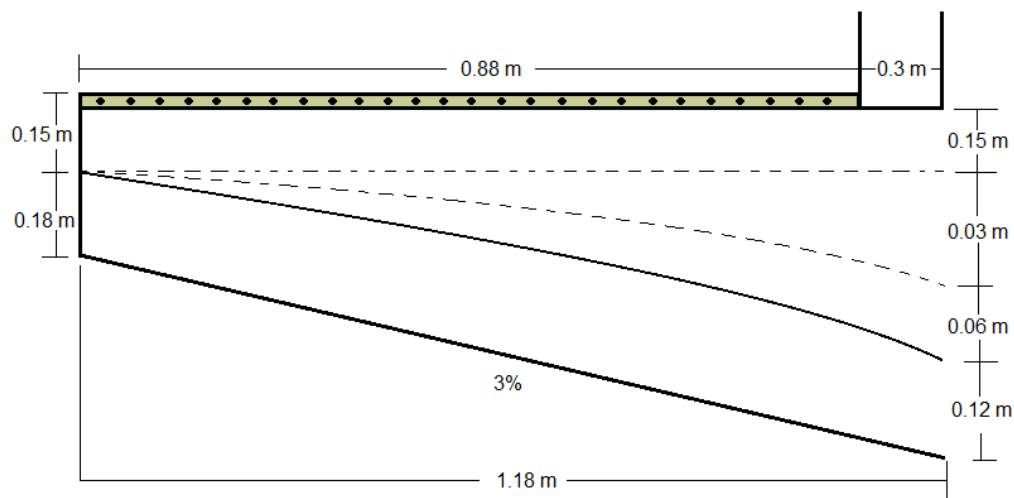


Ilustración 22 Niveles en el canal de aducción.

3.4.1.4 DISEÑO DE LA CAMARA DE RECOLECCIÓN

Para el diseño de la cámara de recolección se aplican de nuevo las ecuaciones de chorro de agua

$$X_s = 0.36Vr^{2/3} + 0.6H^{4/7}$$

$$X_i = 0.18Vr^{4/7} + 0.74H^{3/4}$$

$$B_{cámara} = X_s + 0.3$$

Los resultados de los cálculos anteriores se muestran en la Tabla 16 y se pueden apreciar en la Ilustración 23, la longitud de la cámara se adopta de 1.5 m con el fin de que el mantenimiento y la limpieza se puedan realizar de manera cómoda.

Tabla 16 Cálculos cámara de recolección

| Cámara de recolección | |
|-----------------------|-------|
| Xs (m) | 0.562 |
| Xi (m) | 0.342 |
| B (m) | 0.860 |

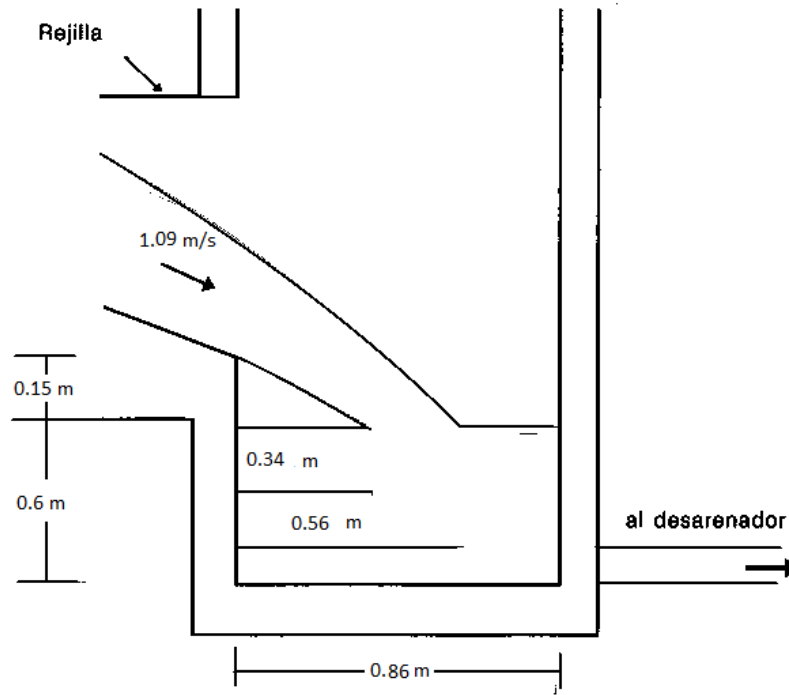


Ilustración 23 Detallado de la cámara de recolección, modificado de (López Cualla, 2003)

3.4.1.5 Desagüe del caudal de excesos

El caudal de excesos se determina teniendo en cuenta que, sobre la rejilla de la bocatoma, pasará un caudal mayor que el caudal de diseño, por lo que se producirá entonces una lámina de agua superior a la de diseño. Para el cálculo de dicha lámina se tiene la siguiente ecuación

$$Q_{captado} = C_d A_{neta} \sqrt{2gH}$$

Donde H se calcula con el máximo caudal. En este caso se tomó el valor máximo de la serie de caudales para el diseño. El valor corresponde a $3.36 \text{ m}^3/\text{s}$. C_d es una constante llamada coeficiente de descarga, su valor es de 0.3; A_{neta} es el área neta de la rejilla en m^2 , H es la altura de la lámina de agua.

$$H = \left(\frac{3.36}{1.84 * 2} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.94 \text{ m}$$

$$Q_{captado} = 0.3 * 0.333 * \sqrt{2 * 9.81 * 0.94} = 0.430 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{Excesos} = Q_{captado} - Q_{diseño} = 0.43 - 0.06 = 0.370 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

3.4.1.6 Vertedero de excesos

El vertedero de excesos se diseña con el fin de disponer los caudales que superan al caudal de diseño y devolverlos de nuevo al cauce del río.

$$H_{excesos} = \left(\frac{Q_{excesos}}{1.84 L_{cámara}} \right)^{2/3}$$

$$V_{excesos} = \frac{Q_{excesos}}{H_{excesos} * L_{excesos}}$$

$$X_s = 0.36 V_{exc}^{2/3} + 0.6 H_{exc}^{4/7}$$

Los resultados de estos cálculos se pueden apreciar en la Tabla 17.

Tabla 17 Cálculos vertedero de excesos

| vertedero de excesos | |
|-----------------------------|-------|
| Q (m^3/s) | 0.365 |
| L (m) | 1.500 |
| H excesos (m) | 0.261 |
| V excesos (m/s) | 0.930 |
| Xs (m) | 0.620 |

Una vez establecidos todos los cálculos se procede a la elaboración de los planos de la obra. En la Ilustración 24 se muestra el diseño en planta de la captación, el corte A-A se muestra en la Ilustración 25.

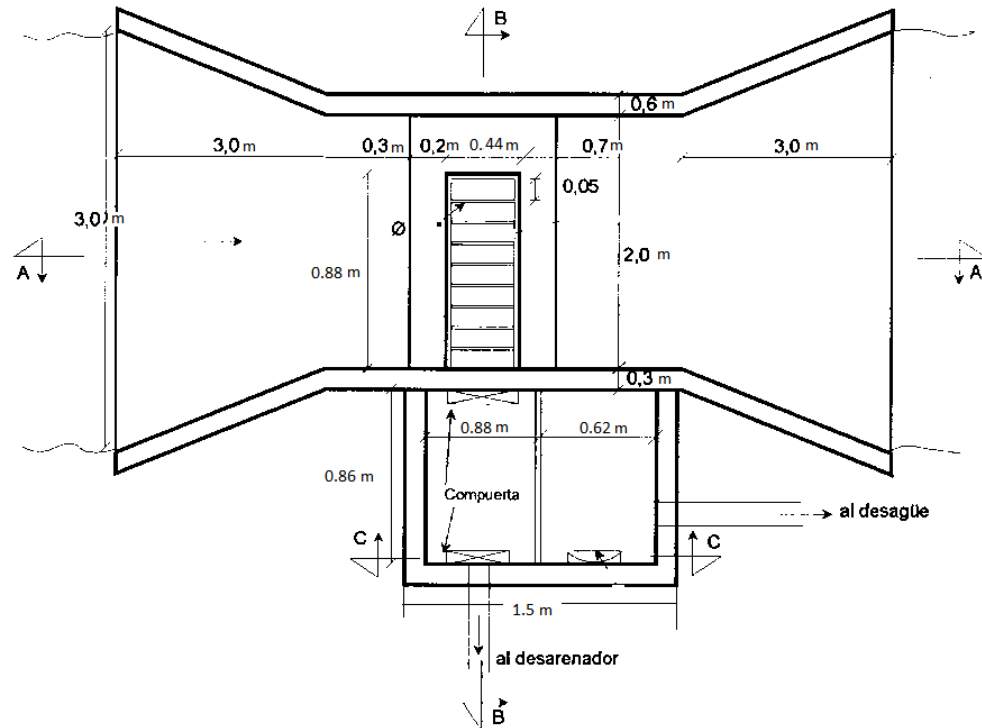


Ilustración 24 Diseño en planta de la captación, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 111)

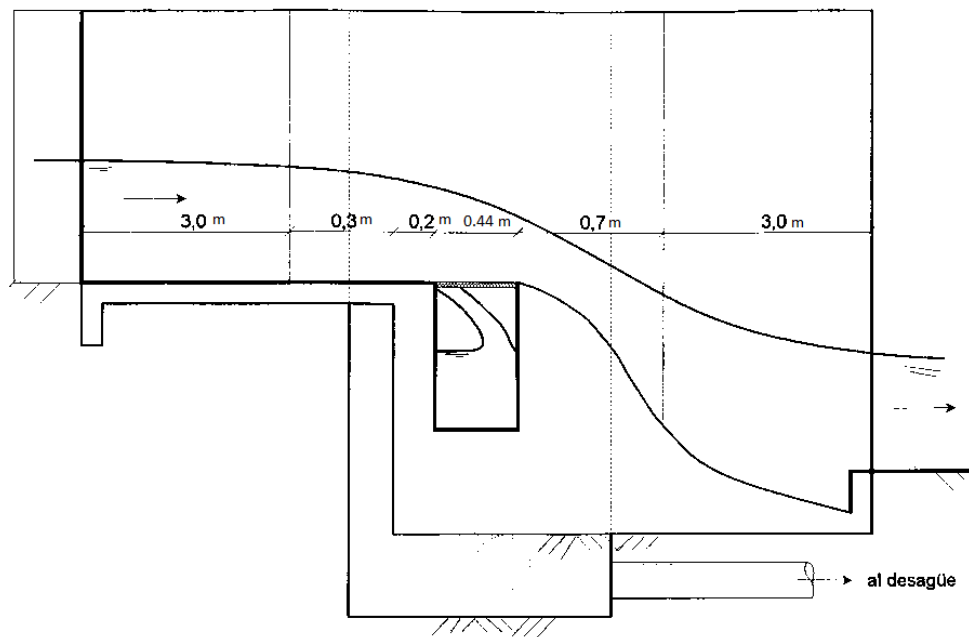


Ilustración 25 Corte A-A captación modificado de (López Cualla, 2003, pág. 112)

El corte B-B se presenta en la Ilustración 26, mientras que el corte C-C se muestra en Ilustración 27

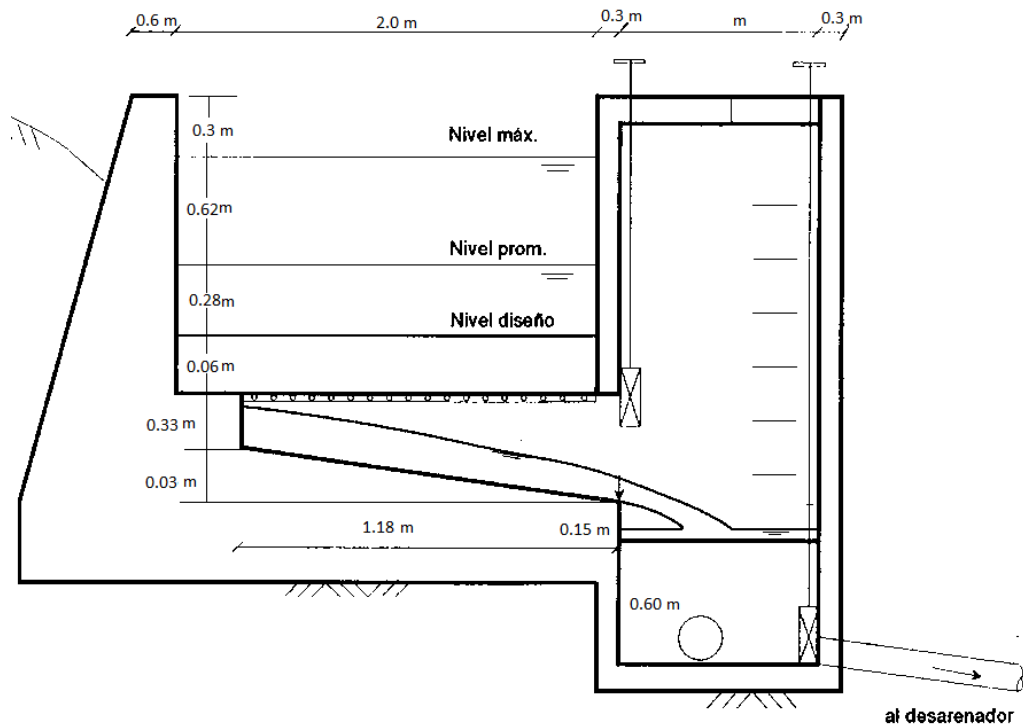


Ilustración 26 Corte B-B de la captación, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 111)

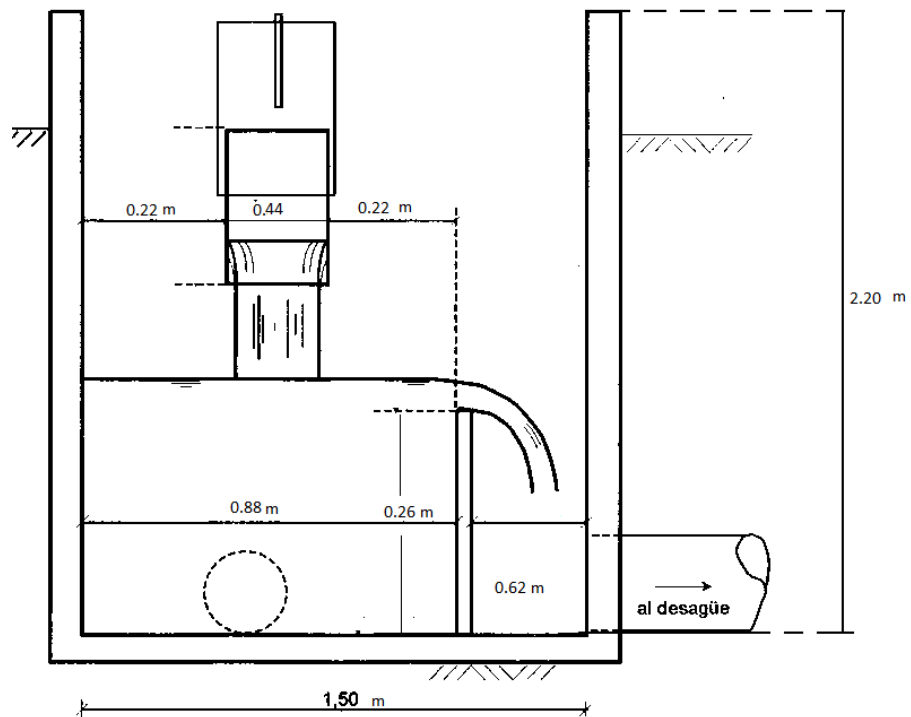


Ilustración 27 Corte C-C captación, modificado de (López Cualla, 2003, pág. 112)

3.4.2 Cantidades y precios de la captación

Una vez establecidos los planos de la captación se procedió a extraer los volúmenes de concreto de obra. Para el acero se realizó un cálculo aproximado con cuantías volumétricas. Las cuantías volumétricas se pueden apreciar en la Tabla 18. Para este caso se tomó la cuantía máxima para tanques de concreto, 110 Kg/m^3 . Las cantidades de concreto y acero se muestran en la Tabla 19.

Tabla 18 cuantías volumétricas, recuperado de (Cordero Bejarano, 2012)

| | |
|-----------|-----------------------------|
| Zapatas | 60 - 80 kg/m ³ |
| Columnas | 80 - 90 kg/m ³ |
| Vigas | 80 - 110 kg/m ³ |
| Losas | 80 - 100 kg/m ³ |
| Escaleras | 100 - 120 kg/m ³ |
| Tanques | 80 - 110 kg/m ³ |

Tabla 19 cantidades de concreto, acero y excavación de la captación

| Volumen total de concreto (m ³) | Acero (kg) | Volumen de excavación (m ³) |
|---|------------|---|
| 20.1 | 2205.9 | 16.0 |

Adicional a esto se estimó la cantidad de metros cúbicos excavados para la realización de la obra. Para esto se multiplicó el volumen de concreto por un factor de disminución equivalente a 0.8, fundamentalmente porque la obra tiene la parte superior de la captación no requiere de excavación. Los metros cúbicos a excavar se muestran en la Tabla 19.

Para los costos se toma el análisis de precios unitarios presentado por CAMACOL. En el informe se presenta un análisis de costos por metro cúbico de concreto el cual se presenta en la Tabla 21. El valor obtenido se multiplica por un factor de amplificación debido a que la obra se encuentra en una zona aislada de la civilización. El mismo factor se le aplica al análisis de precio unitario para el volumen de excavación, dicho análisis se puede apreciar en la Tabla 20.

Tabla 20 Análisis unitario metro cúbico excavación, tomado de Tabla 20

| Descripción | unidad | cantidad | precio | \$ 12.963 |
|--------------------|--------|----------|---------|-----------|
| Ayudante entendido | h | 1.5 | \$5,527 | \$ 8.291 |
| Ayudante raso | h | 1 | \$4,672 | \$ 4.672 |

Tabla 21 Análisis de precio unitario concreto, recuperado de (Camacol, 2016)

| Descripción | unidad | cantidad | Desperdicio (%) | Precio (\$) | Total (\$) |
|--|----------------|----------|-----------------|-------------|------------|
| triturado de 3/4 pulgada | m ³ | 0.67 | 5 | 54,810 | 38,559 |
| arena de concreto | m ³ | 0.67 | 10 | 39,440 | 29,067 |
| cemento gris tipo i (50 kg) | sac | 8.40 | 10 | 27,087 | 250,284 |
| Mano de obra para preparar mezclas | m ³ | 1.00 | 0 | 15,591 | 15,591 |
| Mezcladora 1 saco eléctrica | día | 0.05 | 0 | 33,617 | 1,782 |
| Transporte de agregados m ³ /km | m ³ | 1.44 | 0 | 1,500 | 2,162 |
| transporte saco cemento gris 50 kg | sac | 9.24 | 0 | 350 | 3,233 |
| Total | \$342.677 | | | | |

El kilogramo de acero tiene un precio de \$2.438 (Camacol, 2016), para finalmente establecer el costo de la captación incluyendo el factor de ampliación de precio. Dicho precio se puede ver desglosado en la Tabla 22.

Tabla 22 Análisis de costos totales de la captación

| Elemento | Unidad | Cantidad | Precio unitario (\$) | Factor de ampliación | Precio total (\$) |
|------------|----------------|----------|----------------------|----------------------|-------------------|
| Concreto | m ³ | 20.1 | 342,677 | 1.2 | 8,265,369 |
| Acero | kg | 2205.9 | 2,438 | 1.2 | 6,453,581 |
| Excavación | m ³ | 16 | 12,963 | 1.2 | 248,890 |
| Total | 14,967,840 | | | | |

El valor total de la captación es de aproximadamente 15 millones de pesos.

3.4.3 Diseño del desarenador

“Un desarenador convencional es un tanque construido con el propósito de sedimentar partículas en suspensión por la acción de la gravedad” (López Cualla, 2003).

Un desarenador está constituido por cinco zonas, la primera zona se conoce con el nombre de cámara de aquietamiento, al ampliarse la sección se disipa la energía. La zona dos es la entrada al desarenador, contiene una cortina que obliga a las líneas de flujo a descender con rapidez, esto con el fin de sedimentar el material más grueso inicialmente. La zona tres, conocida como zona de sedimentación, es la zona donde se terminan de sedimentar las demás partículas. La zona cuatro es la salida del desarenador, la componen una pantalla sumergida, el vertedero de salida y el canal de recolección. La zona cinco es la zona de almacenamiento de lodos, está compuesta por el volumen entre la cota de profundidad útil de la zona tres y el fondo del tanque (López Cualla, 2003). Estas cinco zonas se pueden ver en la Ilustración 28.

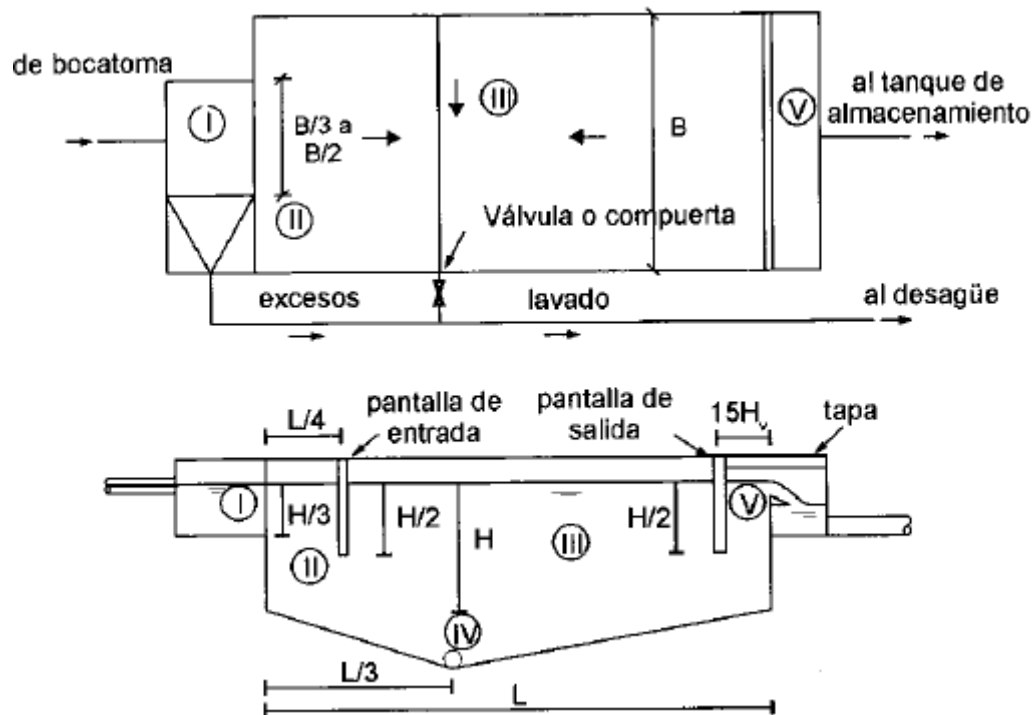


Ilustración 28 Zonas del desarenador, recuperado de (López Cualla, 2003)

3.4.3.1 Carga hidráulica superficial

Se define como el caudal puesto por unidad de área superficial, debe estar entre los 15 y $80 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (López Cualla, 2003).

3.4.3.2 Teoría de la sedimentación

Desarrollada por Hanzen y Stokes, plantea un modelo de sedimentación de partículas que se resume en la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{g}{18} \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} d^2 = kd^2$$

En donde V_s es la velocidad de sedimentación de la partícula en (cm/s), g es la aceleración de la partícula en (cm/s^2), ρ_s es el peso específico de las arenas (2.65), ρ es el peso específico del fluido, 1.0 para el agua; μ es la viscosidad cinemática del fluido en (cm^2/s) (López Cualla, 2003). En el estudio de sedimentación se hacen las siguientes suposiciones teóricas:

El flujo se reparte uniformemente a través de la sección transversal (W).

El agua se desplaza con velocidad uniforme a lo largo del tanque.

Toda partícula que toque el fondo antes de llegar a la salida será removida.

3.4.3.3 Cálculo de parámetros de sedimentación

Los datos necesarios para el cálculo de la velocidad de asentamiento se presentan en la Tabla 23. El valor de d es adoptado; el valor de μ se toma de 0.01473 que equivale a la viscosidad cinemática del fluido a una temperatura de 6°C

$$V_s = \frac{9.81 * (2.65 - 1)}{18 * 0.01473} * 0.05^2 = 14.17 \frac{m}{s}$$

Con el valor de V_s establecido se pasa a calcular el tiempo de asentamiento por medio de la ecuación:

$$t = \frac{H}{V_s}$$

Se asume una altura de 1.50 m y se realiza el cálculo, el resultado se muestra en la Tabla 24.

Tabla 23 datos para el cálculo de los parámetros de sedimentación

| Datos | |
|-------------------------|---------|
| g [cm/s ²] | 981 |
| rs [g/cm ³] | 2.65 |
| r[g/cm ³] | 1 |
| μ | 0.01473 |
| d [cm] | 0.05 |

Tabla 24 tiempo de asentamiento

| Tiempo de asentamiento | |
|------------------------|--------|
| Vs [cm/s] | 15.26 |
| H [cm] | 200 |
| T [s] | 13.104 |

Una vez establecido el tiempo de asentamiento se calcula el período de retención hidráulica con la siguiente expresión

$$\theta = 7 * t = 91.73 \text{ s}$$

Donde θ es el período de retención hidráulico

El volumen del tanque se calcula como

$$V = \theta * Q = 117.42 * 0.06 = 5.50 \text{ m}^3$$

Se calcula el área superficial del tanque en m²

$$A_s = \frac{Vol}{H} = \frac{5.50}{2.0} = 2.75 \text{ m}^2$$

Una vez obtenidos estos valores, se realiza el cálculo de las dimensiones del tanque mediante la siguiente ecuación:

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{4}} = 0.83 \text{ m}$$

“Para la otra dimensión es preferible contar con un tanque rectangular con relación de longitud a ancho (L/B) entre 3/1 y 5/1”(Quintero Betin, 2009). Se decide optar por la opción de 3/1; por lo tanto:

$$L = 3 * 0.83 = 2.49 \text{ m}$$

El caudal por unidad de área superficial q ($m^3/m^2 * día$) se establece como

$$q = \frac{Q}{A_s} = \frac{0.06}{2.75} * 86400 = 1883.8 \text{ m}^3/m^2 * día$$

$$V_0 = \frac{Q}{A_s} * 100 = 2.18 \text{ m/s}$$

Donde V_0 es la velocidad de sedimentación de la partícula crítica.

Posteriormente se calcula la velocidad horizontal V_h

$$V_h = \frac{Q}{W} = \frac{V_0 L}{H} = 4.82 \text{ m/s}$$

Luego se calcula la velocidad de desplazamiento V_d

$$V_d = \sqrt{\frac{8kg(\rho_s - \rho)d}{f}}$$

Donde k y f son constantes, con valores de 0.4 y 0.3 respectivamente

$$V_d = 29.38 \text{ m/s}$$

Se debe garantizar que no habrá resuspensión, por lo que $V_d > V_h$. Se puede ver que se cumple este parámetro.

3.4.3.4 Vertedero de salida

“Con un vertedero de salida de longitud de cresta igual al ancho de la unidad se tiene como altura de agua sobre el vertedero”(Quintero Betin, 2009)

$$H_v = \left(\frac{Q}{1.84B} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.12m$$

$$V_v = \frac{Q}{BH_v} = 0.63 \frac{m}{s}$$

$$X_s = 0.36V_v^{\frac{2}{3}} + 0.6H_v^{\frac{4}{7}} = 0.44 m$$

3.4.3.5 Pantalla de salida

$$Profundidad = \frac{H}{2} = 0.75 m$$

$$distancia a vertedero de salida = 15H_v = 1.77 m$$

3.4.3.6 Pantalla de entrada

$$Profundidad = \frac{H}{2} = 0.75 m$$

$$distancia a cámara de quietamiento = \frac{L}{4} = 0.62$$

3.4.3.7 Almacenamiento de lodos

“Para el diseño de sector tan importante del desarenador se establece la relación longitud/profundidad de lodos, además de adoptar unos valores para la profundidad máxima y mínima.”(Quintero Betin, 2009)

Distancia desde el punto de salida a la cámara de quietamiento

$$\frac{L}{3} = 0.83 m$$

Distancia desde el punto de salida al vertedero de salida

$$\frac{2L}{3} = 1.66 m$$

Pendiente transversal:

$$S_t = \frac{Prof_{máx} - Prof_{mín}}{B} = \frac{0.25 - 0.20}{0.83} = 0.06$$

Para la pendiente transversal se adopta una profundidad máxima de 25 cm y una profundidad mínima de 20 cm

Pendiente longitudinal en (L/3):

$$St_{L/3} = \frac{Prof_{m\acute{a}x} - Prof_{m\acute{i}n}}{distancia\ c\acute{a}mara\ aquietamiento} = 0.06$$

Pendiente longitudinal en (2L/3)

$$St_{2L/3} = \frac{Prof_{m\acute{a}x} - Prof_{m\acute{i}n}}{distancia\ vertedero\ de\ salida} = 0.03$$

3.4.3.8 Cámara de aquietamiento

Profundidad

$$\frac{H}{3} = 0.5\ m$$

Ancho

$$\frac{B}{3} = 0.28\ m$$

Largo adoptado de 1.0 m

Una vez establecidos todos los cálculos se procede a la elaboración de los planos de la obra, en la Ilustración 29 vista en planta del desarenador, modificado de Ilustración 29 se presenta la vista en planta del desarenador. La Ilustración 30 muestra el corte A-A del plano en planta; finalmente la Ilustración 31 presenta el corte de la sección B-B.

De igual manera que en el diseño de la captación, después de tener los planos de la obra civil, se procede a sacar las cantidades. con estas y el análisis de precio unitario, se obtiene el costo del desarenador.

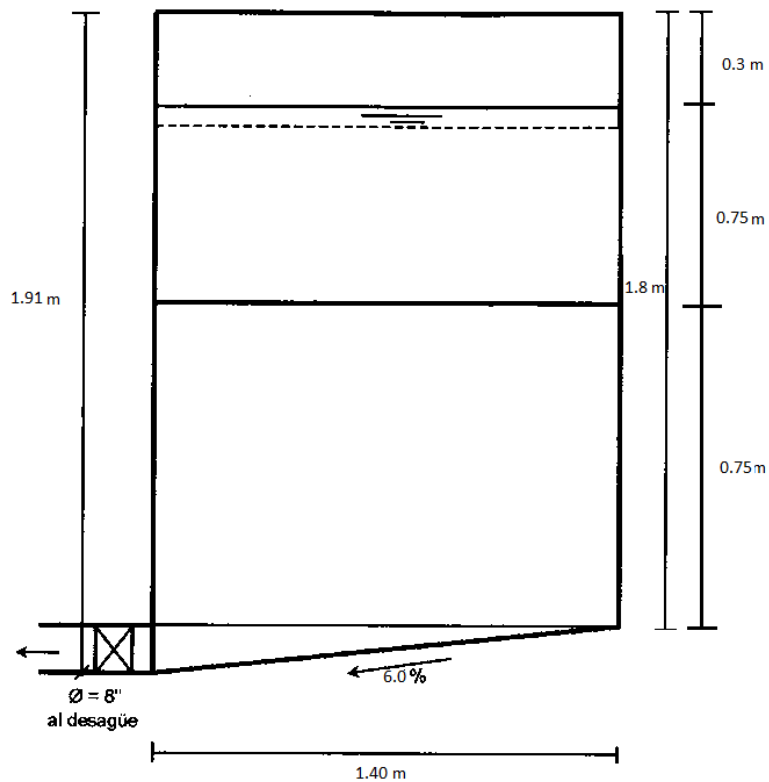


Ilustración 31 Corte B-B desarenador, modificado de (López Cualla, 2003)

3.4.3.9 Cantidades y precios del desarenador

Nuevamente se utiliza la cuantía volumétrica que se presenta en la Tabla 18 y se utiliza el valor correspondiente a la cuantía para tanques. Una vez establecido esto, se presentan las cantidades de concreto, acero y excavación. En este caso el valor de metros cúbicos excavados no tendrá un factor inferior a uno, sino que se estableció que fuera ligeramente mayor a uno, como factor de seguridad en caso de que se requiera hacer alguna excavación adicional el valor adoptado es de 1.1 veces el volumen de concreto. La anterior información se presenta en la Tabla 25.

Tabla 25 cantidades de concreto, acero y excavación desarenador

| Volumen concreto (m^3) | Acero (kg) | volumen de excavación (m^3) |
|----------------------------|------------|---------------------------------|
| 3.6 | 397.815 | 4.0 |

Basados en los análisis de precio unitario de la Tabla 20 y de la Tabla 21 se obtuvieron los costos de metros cúbicos de concreto y de excavación. El precio del acero es adoptado del análisis de precio unitario de Camacol y le corresponde un valor de \$2.438.

Tabla 26 Cantidades y precios del desarenador

| Elemento | Unidad | Cantidad | precio unitario | factor de ampliación | Precio total |
|--------------|----------------|----------|-----------------|----------------------|--------------|
| concreto | m ³ | 3.6 | \$ 342,677 | 1.2 | \$ 1,480,365 |
| acero | kg | 397.8 | \$ 2,438 | 1.2 | \$ 1,163,804 |
| excavación | m ³ | 4 | \$ 12,963 | 1.2 | \$ 62,222 |
| Total | | | | | \$ 2,706,391 |

La obra del desarenador tiene un valor aproximado a los 2.7 millones de pesos, como se muestra en la Tabla 26. El factor de ampliación de precio es debido a que la obra se encuentra alejada de la civilización, y esto incrementa los costos.

3.4.4 Cantidad y precio de la conducción

De la Ilustración 11 se puede apreciar que, para obtener una cabeza de 20 m, se necesita desplazarse 300 m en la horizontal. Para poder obtener los metros lineales de conducción, se asume un triángulo rectángulo al cual se le desea conocer su hipotenusa. El valor encontrado se mayor como una aproximación a las posibles irregularidades del terreno. De lo anterior se tiene que la longitud en línea recta sería

$$L = \sqrt{20^2 + 300^2} = 300.67 \text{ m}$$

La longitud corregida está dada por

$$L' = 1.3L = 390.9 \text{ m}$$

El tubo se vende la unidad con 6 metros de longitud por lo tanto se requiere conocer la cantidad de tubos a pedir, para eso se tiene que

$$q = \frac{L'}{6} = 65.14 \text{ tubos}$$

Donde q es la cantidad de tubos, debido a que el valor decimal es muy pequeño se redondea a 65 tubos.

El precio por tubo es de 890.900 (Homecenter, 2017)

Reuniendo la anterior información se tiene que la cantidad de tubos y su precio son los mostrados en la Tabla 27.

Tabla 27 cantidad y precio conducción

| Elemento | diámetro | precio unitario | cantidad | precio total |
|-------------------------|----------|-----------------|----------|---------------|
| Tubo Snap Rde 21 200Psi | 8" | \$ 890,900 | 65 | \$ 57,908,500 |

3.4.5 Costo de la turbina

La turbina seleccionada, la Toshiba Hydro eKids tiene un precio comercial de entre US \$7.000 y US 30.000 según como se puede apreciar en la Tabla 28. La oscilación del precio depende del tipo de turbina. Toshiba ofrece 5 tipos de turbina como lo muestra la Ilustración 16. Debido a que el tipo de turbina seleccionada S3C pertenece al rango bajo de generación, su costo se estimó en US \$14.000. Con una tasa representativa del mercado de \$2.933,92 COP (Dólar Web, 2017), el precio de la turbina sería de \$41'074.880 COP.

Tabla 28 precio de la turbina seleccionada, recuperado de (Capua, Dzwonkoski, Harris, & Plummer, 2014)

| <i>Manufacturer/ Model</i> | <i>Applicable Head (feet)</i> | <i>Applicable Flow (MGD)</i> | <i>Cost</i> | <i>Power Output (kW)</i> |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Energy Systems and Design Model LH 1000 | 10 | 1.3 | \$3,000 | 1 |
| Power Pal Model MHG 1000LH | 5 | 3.2 | \$4,000 | 1 |
| Canyon Hydros Kaplan Turbine | 30 - 50 | 64.6 - 258.5 | \$30,000 - \$500,000 | unavailable |
| Toshiba International Horizontal Hydro-eKIDS | 6.6 - 49.2 | 0.6 - 77.6 | \$7,000 - \$30,000 | 5 - 250 |
| VLH Turbine | 4.2 - 10.5 | 0.2 - 0.5 | \$575,000 - \$1,100,000 | 100 - 500 |
| Voith Siemens | 6 - 66 | 2.3 - 91.3 | \$650,000 - \$800,000 | unavailable |
| HydroCoil | 10 - 60 | 0.8 | unavailable | unavailable |

3.4.6 Costo de la casa de máquinas

Por ser un proyecto relativamente simple, la casa de máquinas no es más que una pequeña edificación de una planta. En primera instancia se obtienen las dimensiones de la turbina directamente del distribuidor. dicha información se presenta en la Tabla 29. Se puede apreciar que las dimensiones de la turbina son: 1.2 m de largo; 0.55 m de ancho y una altura de 0.9 m. Del análisis de precios unitarios de Camacol se obtuvo el análisis de un campamento en ladrillo de 24 m². Este se realizaría de 6 metros de ancho por 4 metros de ancho. Estas dimensiones permitirían el posicionamiento de la turbina y brindarían espacio adicional para el posterior mantenimiento de la misma. El costo de dicho campamento se presenta en la Tabla 30.

Tabla 29 dimensiones de la turbina Hydro eKids recuperado de (Toshiba, 2016)

| Type | | L | M | S | S3 | S3C |
|-----------------------------------|--------|------|------|------|-----|------|
| Dimension | L (mm) | 4600 | 2050 | 1260 | 800 | 1200 |
| | W (mm) | 1600 | 1110 | 600 | 550 | 550 |
| | H (mm) | 2500 | 1700 | 1000 | 900 | 900 |
| Diameter of Pipe Flange (Inflow) | A (mm) | 1350 | 600 | 300 | 200 | 200 |
| Diameter of Pipe Flange (Outflow) | A (mm) | 1000 | 600 | 300 | 200 | 200 |
| Weight (Turbine & Generator)*1 | Ton | 7.5 | 3.1 | 1.0 | 0.5 | 0.6 |

La Tabla 30 muestra que el precio de la casa de máquinas sería de \$5'497.877, siguiendo el procedimiento realizando en el cálculo de los anteriores costos, se mayor a un 20% para tener un costo total final de \$6,597,452.

Tabla 30 Análisis unitario para casa de máquinas, recuperado de (Camacol, 2016)

| Elemento | Unidad | Cantidad | Precio unitario | Total |
|---|----------------|----------|-----------------|-------------|
| Teja ondulada Eternit | und | 14 | \$42,420 | \$599,819 |
| Ventanal corredizo de 1.2 x1.2 | m ² | 4 | \$124,120 | \$501,445 |
| Piedra | m ³ | 5.6 | \$56,376 | \$331,491 |
| Concreto 2500 psi | m ³ | 5.2 | \$319,075 | \$1,742,150 |
| Mortero 1:7 en obra | m ³ | 2.9 | \$194,471 | \$592,165 |
| Ladrillo perforación horizontal liso 10-20-40 | und | 632 | \$1,120 | \$721,997 |
| Arenilla triturada | m ³ | 1.4 | \$23,200 | \$35,078 |
| Oficial de 2a obra negra | H | 56 | \$5,527 | \$309,524 |
| Ayudante entendido | H | 112 | \$5,527 | \$619,048 |
| M.de. O acarreo int.mat.de lleno 40 ml | m ³ | 1.512 | \$6,241 | \$9,436 |
| Acarreo interno mezclas | m ³ | 3.045 | \$8,284 | \$25,225 |
| Transporte agregado m ³ /km | m ³ | 7 | \$1,500 | \$10,500 |
| Total | | | | \$5,497,877 |

3.4.7 Costo total del proyecto

El costo total del proyecto está dado por la suma entre el costo de las obras civiles más el costo de la turbina. Esto se traduce como \$132'082.682 COP como se refleja en la Tabla 32. Como se ha mencionado anteriormente los costos se mayoran.

En la Tabla 32 se pueden apreciar otros dos proyectos de micro generación, para los cuales los costos de ambos proyectos son similares, teniendo en cuenta que las necesidades no distan mucho de las necesidades del proyecto que se está analizando.

La agencia internacional de energía renovable (IRENA) establece que el costo por kW es de US \$3.500 para zonas urbanas mientras que para zonas rurales puede incrementar

significativamente. El costo por kW para este proyecto se calculó en US \$4.500 por lo que se puede ver que no se aleja mucho de lo que dice la agencia.(Irena, 2015)

Tabla 31 proyectos de micro generación similares recuperado de (Hokenson, Coultres, Fuller, & Neuberg, 2011) y (Capua et al., 2014)

| Proyecto | año | delta de altura (m) | Potencia (kW) | Caudal (m3/s) | costo |
|---|------|---------------------|---------------|---------------|----------------|
| El tigre | 2011 | 14 | 15 | 0.3 | \$ 222,105,079 |
| Reclamation of Power in Wastewater Treatment Facilities | 2014 | 1.7 | 19.9 | 1.4 | \$ 145,311,190 |

Tabla 32 Costo total del proyecto

| Descripción | Precio | Aumento porcentual | Precio total |
|--------------------|---------------|--------------------|----------------|
| Captación | \$ 15,003,840 | 20% | \$ 18,004,608 |
| Desarenador | \$2,255,326 | 20% | \$2,706,391 |
| Conducción | \$ 57,908,500 | 10% | \$63,699,350 |
| Turbina | \$41,074,880 | 0% | \$41,074,880 |
| Casa de máquinas | \$ 5,497,877 | 20% | \$6,597,452 |
| Total del proyecto | | | \$ 132,082,682 |

4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

El proyecto es técnicamente viable. En primera instancia, porque se cuenta en campo con los dos requisitos esenciales para la generación de los 10 kW. Estos son: cabeza de presión, que para este caso es de 20 m. Y caudal de $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$. En segunda instancia porque el costo del proyecto, corresponde a un valor típico para esta forma de generación de energía. Finalmente, porque la tecnología seleccionada es importada al país con facilidad y cuenta con beneficios tributarios para dicho proceso.

En la actualidad no se cuenta con buena información para la alta montaña. Como se pudo apreciar en el proyecto, se debió recurrir a métodos de regionalización para obtener la información necesaria, sin embargo, esta información al no ser de primera mano se presta para errores en los cálculos y podría verse reflejado en futuros errores constructivos o fallas en el servicio que se está prestando.

El estudio muestra que se está utilizando muy poco del caudal que brinda la corriente, por lo tanto, en el caso de que se llegara a necesitar de más energía por las condiciones mismas del centro de investigación o por cualquier otra necesidad externa la zona cuenta con las condiciones potenciales suficientes para suplir la necesidad.

Una alternativa para el centro de investigación sería conectarse directamente a la red. Esto no quiere decir que se deba despreciar este proyecto, por el contrario, brindaría la oportunidad de convertirse en un prosumidor. Esto quiere decir que cuenta con la posibilidad de consumir energía de la red, pero a la vez está en la capacidad de venderle a la red cuando sus consumos son muy bajos y se está produciendo energía. Esta discusión se plantea como futuro trabajo de grado donde de igual manera se pueda discutir el tema de las baterías como alternativa, ya que por un lado disminuyen los costos de las obras civiles, pero por otro lado su adquisición e importación tendrían un efecto importante en los costos.

Debido a que gran parte de la tecnología requerida para la generación es proveniente del exterior, se es muy vulnerable a la tasa representativa del mercado, por lo tanto, este es un factor que juega mucho a la hora de analizar los costos del proyecto. Se ve que el proyecto está dentro de los costos normales de este tipo de sistemas de generación, sin embargo, se propone como futuro trabajo analizar qué tan atractivo es para la universidad una inversión de esta clase, y qué frutos podría llegar a obtener. Hay que tener en cuenta en este sentido que la inversión no sería solo de índole económica, sino que fomentaría la investigación en la universidad no solo por las características del centro de investigación sino porque se contaría con mediciones y datos que arroje la pequeña central, lo que daría un paso importante al fomento de este tipo de energías renovables.

En todo momento se buscó que el trabajo realizado afectara lo menos posible el medio ambiente de la zona, sin embargo, la intervención humana trae consigo, cambios en los ecosistemas y estos cambios deben de ser evaluados con profundidad antes de poner en marcha el proyecto.

5. REFERENCIAS

- Arango arbeláez, p., & maya ruiz, p. (2015a). esquema de micro-generación hidroeléctrica a escala municipal.
- Arango Hernández, R. (2016). Manual EnerGis.
- Camacol. (Septiembre de 2016). Análisis de precio unitario. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Capua, M., Dzwonkoski, J., Harris, C., & Plummer, J. D. (2014). Reclamation of Power in Wastewater Treatment Facilities.
- Cordero Bejarano, E. F. (18 de Septiembre de 2012). *Scribd*. Obtenido de Cuantías para hormigón: <https://es.scribd.com/doc/106221752/CUANTIAS-PARA-HORMIGON>
- Demetriades, G. M. (2000). *The use of induction generators for small-scale hydroelectric schemes in remote areas*.
- Dólar Web. (12 de Mayo de 2017). Obtenido de <http://dolar.wilkinsonpc.com.co/divisas/dolar.html>
- GOTTA ingeniería. (2015). *Modelación hidrológica distribuida para el proyecto: Inferencia de cambios de condiciones climáticas y sus impactos en la dinámica de ecosistemas de alta montaña. Estudio caso: Cuencas hidrográficas de los ríos Claro y Otún, Parque Nacional De Los Nevados*. Envigado: Gotta.
- Hernández, R. (2016). Metodología y Herramienta computacional para la identificación y evaluación automatizada de proyectos hidroeléctricos con Derivación y a Pie de Presa.
- Hokenson, T., Coultres, B., Fuller, J., & Neuberg, G. (2011). Sustainable Design for a Hydropower System in the Comarca Ngöbe-Buglé, (December), 77–122. Retrieved from <http://www.cee.mtu.edu/~dwatkins/idesign09/2011/EITigreReport.pdf>
- Homecenter. (12 de Mayo de 2017). *Tubo Snap Rde 21 200Psi 8Pulgx6m*. Obtenido de Homecenter: <http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/121972/Tubo-Snap-Rde-21-200Psi-8Pulgx6m/121972>
- IDEAM. (2014). *Subdirección de Meteorología – IDEAM*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Regionalizaci%C3%B3n+de+la+lluvia+en+Colombia.pdf/92287f96-840f-4408-8e76-98b668b83664>
- Irena. (2015). Renewable Power Generation Costs in 2014 : An Overview, (January), 92. Retrieved from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf

- López Cualla, R. A. (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá: Escuela Colombiana de la Ingeniería.
- Madrid, M. E., Toro, J. M., & Ortega, S. (2015). Hydrodynamic screws as an alternative for small hydropower generation in Colombia, 195, 15–23. <https://doi.org/10.2495/ESUS150021>
- Madrid Wolff, M. E., & Toro Bedoya, J. M. (2013). VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE TORNILLOS HIDRODINÁMICOS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA CASO QUEBRADA EL CHUSCAL. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Marbello, R. (1997). *Fundamentos para la práctica de laboratorios de hidráulica*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Quintero Betin, K. B. (2009). Metodologías de diseño de obras hidráulicas en estudios de pre factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas, 78. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/1287/>
- Ruíz, D., Gutiérrez, M. E., & Ortega, S. (2016). *THE RÍO CLARO MOUNTAIN OBSERVATORY “POLEKA KASUE”: IMPROVING OUR UNDERSTANDING OF THE COMPLEXITY OF TROPICAL HIGH-ALTITUDE WATERSHED HYDROLOGY*.
- Ruíz Carrascal, D. (11 de Noviembre de 2016). Charla sobre importancia del estudio de la alta montaña en el trópico. (S. Correa, Entrevistador)
- Sierra Vargas, F. E., Sierra Alarcon, A. F., & Guerrero Fajardo, C. A. (2011). Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica. *Informador Tecnico, Ed. 75*, 73–85.
- Toshiba. (2016). Toshiba International Corporation Pty Ltd - Oceani. Retrieved May 12, 2017, from http://www.tic.toshiba.com.au/product_range/
- Universidad EIA. (09 de Diciembre de 2009). *Fluidos EIA*. Obtenido de Mecánica de fluidos y recursos Hidráulicos: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/interesantes/impacto/impacto.htm>
- Williamson, S. J., Stark, B. H., & Booker, J. D. (2014). Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis. *Renewable Energy*, 61, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.020>